

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica



TESIS DOCTORAL

**Sistemas generadores de niebla para usos en seguridad y
descontaminación. Aplicación al escenario nuclear-
radiológico**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Laura Pascual Arnáiz

Director

Javier Quiñones Díez

Madrid, 2018



Sistemas generadores de niebla para
usos en seguridad y descontaminación.

Aplicación al escenario
nuclear-radiológico

TESIS DOCTORAL

Laura Pascual Arnáiz

Madrid, marzo de 2017



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA, INDUSTRIA
Y COMPETITIVIDAD

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



Sistemas generadores de niebla para
usos en seguridad y descontaminación.

Aplicación al escenario
nuclear-radiológico

TESIS DOCTORAL

Laura Pascual Arnáiz

Director:
Dr. Javier Quiñones Díez

Madrid, marzo de 2017

A las grandes científicas olvidadas

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer la financiación al proyecto COUNTERFOG enmarcado dentro del 7º Programa Marco gracias al cual he podido proseguir mi formación como investigadora, así como al CIEMAT y a la Subdirección de Seguridad y Mejora de las Instalaciones, donde inicié mi andadura gracias a una beca FPI.

Las personas que han influido en mí a lo largo de mi trayectoria como estudiante y profesional son numerosas y gracias a todas ellas fui encauzando y encontrando mi vocación en una profesión no siempre fácil. Pero en concreto, a lo largo de mis años de estudiante un número más reducido de personas me impulsaron a sacar lo mejor de mí.

En el ámbito profesional, algunas veces rozando lo personal, me gustaría hacer mención a mis dos directores de proyecto fin de carrera (Chema e Isabel), ya que ellos fueron los que inocularon en mí el virus de la investigación, un bicho que no es fácil alimentar y cada vez quiere más y más. Y en especial, a mi director de tesis, Dr. D. Javier Quiñones Díez. No es sencillo dar con un jefe como Javier, que se preocupe tanto por su gente, así como no es sencillo encontrar una persona de la que sabes que vas a aprender mil y una cosas en cada conversación que mantengas con él. Muchas gracias con confiar en mí, y hacer de mí lo que espero sea algún día una gran profesional.

No me quería dejar en el tintero a mi otro jefe, Luis, y a mi unidad, gracias por el apoyo y los servicios prestados a la Unidad de Emergencias y Protección Física. Porque el CIEMAT con nosotros es un poco más seguro!

Unidad NRBQ, Marta, ¡ya podías haber llegado antes! Creo que voy a poder aprender mucho a tu vera y espero poder seguir creciendo como profesional a tu lado, gracias por el último empujón que me has dado.

Luis J. Amigo, a ti ya no se en que unidad o subdirección meterte, me mareas, y imira que tu mesa está a un metro de la mía! Gracias por saber de todo y ayudar en lo que sea menester, si esto del doctorado no sale bien, cuenta conmigo de hortelana en tu querido pueblo.

En el ámbito personal son muchas las personas que han hecho este camino más fácil y que siempre han creído en mí...Empezaré por mi familia, gracias a todos (padres, madres, suegrxs, hermanos, cuñadxs, así como últimas incorporaciones), pero en concreto tengo que destacar a mi padres, Pili y Chema, por la gran oportunidad que me han dado al poder disfrutar de la mejor educación posible y apoyarme siempre de la manera que fuese en mis estudios. Soy consciente de la suerte que he tenido, ya que hoy en día muchas mentes brillantes se quedan por el camino por culpa del nefasto apoyo que reciben desde nuestras instituciones. Asimismo, quiero extender mi agradecimiento especial a mi hermano, David, quien inculcó el "frikismo" en mí, sí, luego me he encargado de desarrollarlo yo solita pero tú fuiste el primero.

Además de familia, quiero ampliar el agradecimiento a amigos y compañeros que sirven para desahogar mucha tensión en momentos muy críticos. Yendo más al grano,

gracias a los amigos de toda la vida, por vuestro apoyo en forma de cerveza, whisky o lo que necesitara... sé que nunca me vais a considerar doctora de verdad, será de mentira como Ross Gueller, pero algo es algo.

Compañeros de carrera, qué gran recuerdo la universidad, ¡todo felicidad! Ojalá pudiéramos volver... todo empezó ahí, si no nos hubiéramos conocido a lo mejor no estaría escribiendo estas líneas ahora mismo, quién sabe. Me gustaría hacer una mención especial a algunas personas en concreto. En primer lugar a mi química favorita, Lore, ampliación de física en primero de carrera hizo que nuestras vidas se cruzaran, y miranos, 11 años ¡y aquí seguimos! Y a mis materiólogos preferidos (Fringe división), ¡cómo os echo de menos!, volved a Madrid ya...Alberto, siempre fuiste mi mentor estudiantil y mi avanzadilla, y tú, Andrea, mi catalana favorita...¡qué decirte, si me enseñaste a dibujar estrellas!

Y cómo no, gracias compañeros CIEMATICOS ¡gracias por vuestra acogida!! Y os adelanto el agradecimiento por tragáros estoicamente mis futuros ensayos para la defensa de tesis, desde aquí os pido perdón y espero que os guste. ¡Gritad conmigo! ¡Viva la Subdirección de Seguridad y Mejora de las Instalaciones!, ¡¡¡¡VIVA!!!!

Y para el final dejo al más importante, no me he olvidado de ti, esta persona es amigo y familia, y desde hace poco familia OFICIAL, gracias a mi MARIDO Alfredo. Gracias, gracias, gracias, gracias y gracias. Nunca podré darte las gracias por el apoyo prestado...Sé que este último año no lo he puesto muy fácil, pero mira, parece que al final todo nuestro esfuerzo va a dar su fruto. Sé que desde el principio has perseguido mis metas junto a mí, dejando posiblemente a un lado las tuyas, y por eso este futuro doctorado (espero) es tan tuyo como mío. Gracias por ser el mejor de los amigos, el mejor de los novios y el mejor de los maridos. Nuestro camino continúa y estoy ansiosa por perseguir juntos nuestro próximo objetivo. Te quiero mucho cariño, hoy y siempre.

Y casi se me olvida, gracias Nala por tu apoyo perruno, tú sí que te has tragado horas delante del ordenador conmigo, en ocasiones participaste pisando mi teclado, te dedico este ¡ñsd!hfuiwñadhfsañdlfhñads!

¡GRACIAS A TODOS!

Índice

0. Summary / Resumen	a
0.1 Introduction	a
0.2 Material selection and simulations	b
0.2.1 Selection materials	b
0.2.2 Structural analysis of the nozzles	c
0.3 Decontamination trials	d
0.3.1 Characterization of the pollutant	d
0.3.2 Effectiveness of the countermeasure system	d
0.4 Conclusions	e
0.5 Introducción	a
0.6 Selección de materiales y modelos	a
0.6.1 Selección de materiales	a
0.6.2 Análisis estructurales de las boquillas	b
0.7 Ensayos de descontaminación	d
0.7.1 Caracterización del contaminante	d
0.7.2 Efectividad del sistema contramedida	d
0.8 Conclusiones	e
1. Objetivos	1
2. Introducción	3
2.1 Agentes NRBQ	4
2.1.1 Estado del arte del uso bélico de agentes NRBQ	4
2.1.1.1 Utilización en enfrentamientos bélicos	4
2.1.1.2 Ataques terroristas aislados	8
2.1.1.3 Accidentes industriales con agentes NRBQ involucrados	8
2.1.2 ¿Es realista considerar la amenaza NRBQ?	10
2.1.2.1 Iniciativas internacionales	12
2.1.2.1.1 OIEA	12
2.1.2.1.2 CSNU 1540	12
2.1.2.1.3 GICNT	13
2.1.3 Agentes NRBQ. Efectos y selección de simuladores	13
2.1.3.1 Agentes nucleares y radiológicos	13
2.1.3.1.1 Efectos de la exposición a fuentes radiactivas	14
2.1.3.1.2 Simuladores NR seleccionados	15
2.1.3.2 Agentes químicos	16
2.1.3.2.1 Efectos de los agentes químicos de guerra	17
2.1.3.2.2 Simuladores químicos seleccionados	17
2.1.3.3 Agentes biológicos	19
2.1.3.3.1 Simuladores biológicos seleccionados	20
2.1.4 Sistemas de detección y respuesta ante agentes NRBQ	20
2.1.4.1 Agentes NR	20
2.1.4.1.1 Detección de radiaciones ionizantes	20
2.1.4.1.2 Sistemas actuales de respuesta NR	21
2.1.4.2 Agentes Químicos	22
2.1.4.2.1 Detección de CWA	22
2.1.4.2.2 Sistemas actuales de respuesta frente a CWA	22
2.1.4.3 Agentes Biológicos	23
2.1.4.3.1 Detección de agentes biológicos	23
2.1.4.3.2 Sistemas actuales de respuesta frente a agentes biológicos	23
2.2 Fuego	24

2.2.1	Sistemas de respuesta frente al fuego	25
2.2.1.1	Boquillas comerciales de agua nebulizada.....	27
2.3	Agua nebulizada	29
2.3.1	Clasificación y tipos de niebla	29
2.3.1.1	Clasificación del agua nebulizada en base a las normativas.....	29
2.3.1.2	Técnicas básicas para la generación de agua nebulizada	30
2.4	¿Qué utilizamos frente a un riesgo combinado?	31
3.	Procedimiento experimental	33
3.1	Diseño y descripción del laboratorio	33
3.2	Diseños iniciales y rediseños de las boquillas	36
3.2.1	Comparación teórica de las nieblas generadas por los diseños B y F	39
3.2.2	Otros diseños	42
3.3	Materiales base para la realización de las boquillas	43
3.3.1	Aleaciones de aluminio	43
3.3.1.1	AA 6XXX	43
3.3.1.2	AA 7XXX	44
3.4	Mecanizado de las boquillas	45
3.4.1	Tolerancias.....	47
3.4.2	Despiece de las boquillas fabricadas	47
3.4.2.1	Despiece de las boquillas a escala 1:1.....	47
3.4.2.2	Despiece de las boquillas a escala 1:2.....	48
3.4.2.3	Despiece de las boquillas a escala 1:3.....	51
3.5	Simuladores de agentes NRBQ seleccionados	53
3.5.1	Dispersión de los radionucléidos	54
3.5.1.1	Pistola aerográfica de gravedad.....	54
3.5.1.2	Explosión de globos cargados con el agente a dispersar	55
3.6	Selección de aditivos	57
3.7	Técnicas de caracterización	59
3.7.1	Propiedades mecánicas de las aleaciones	59
3.7.2	Caracterización metalográfica	60
3.7.3	Medida de durezas	60
3.7.4	Distribución de tamaño de partícula	61
3.7.5	Detección óptica de partículas suspendidas en la atmósfera	61
3.7.5.1	Técnicas ópticas cualitativas	62
3.7.5.1.1	CCTV + luz natural.....	62
3.7.5.1.2	CCTV + láser.....	62
3.7.5.1.3	CCTV + linterna LED	62
3.7.5.2	Técnicas ópticas cuantitativas	62
3.7.5.2.1	CCTV + detector de partículas	63
3.8	Códigos para simulación y modelación	64
3.8.1	Selección de materiales	64
3.8.2	Evaluación de tensiones.....	64
3.8.3	Modelación termodinámica	66
3.9	Procedimientos de ensayos de contramedida.....	67
3.9.1	Ensayos de caracterización del comportamiento de los simuladores NR.....	67
3.9.1.1	Puesta a punto del sistema de dispersión del agente contaminante.....	67
3.9.1.2	Monitorización cuantitativa de la pluma de contaminante	67
3.9.2	Ensayos de descontaminación	67
3.9.2.1	Ensayos preliminares de interacción agente/niebla	67
3.9.2.2	Ensayos de cuantificación	69

4. Resultados y discusión	71
4.1 Diseños iniciales y rediseños de las boquillas	71
4.1.1 Modificaciones propuestas al diseño original	71
4.1.1.1 Modelo B	72
4.1.1.2 Modelo F	73
4.1.2 Comprobaciones de rediseño previas a la fabricación	74
4.1.3 Escalado de las boquillas originales	76
4.1.3.1 B 1:2	76
4.1.3.2 F 1:2	76
4.1.3.3 B 1:3 y F 1:3	77
4.2 Selección de materiales para la fabricación de las boquillas	77
4.2.1 Modelación base del comportamiento en operación	82
4.2.2 Optimización de la selección de materiales	83
4.3 Caracterización del material base de las boquillas	88
4.3.1 AA 6082 - T6	88
4.3.1.1 Caracterización metalográfica	88
4.3.1.2 Determinación de las propiedades mecánicas	89
4.3.1.3 Análisis fractográfico	95
4.3.2 AA 7075 - T6	103
4.3.2.1 Caracterización metalográfica	104
4.3.2.2 Determinación de las propiedades mecánicas	105
4.3.2.3 Análisis fractográfico	111
4.3.3 Conclusiones parciales - Comparativa de las aleaciones	112
4.3.3.1 Material base	113
4.3.3.2 Resultados de los ensayos mecánicos	114
4.4 Modelación de comportamiento en operación. Simulaciones Von Mises	116
4.4.1 Boquilla B	117
4.4.1.1 Diseño original, escala 1:1	118
4.4.1.2 Escala 1:2	124
4.4.1.3 Escala 1:3	130
4.4.1.4 Influencia del escalado en las propiedades mecánicas	136
4.4.2 Boquilla F	139
4.4.2.1 Diseño original, escala 1:1	140
4.4.2.2 Escala 1:2	146
4.4.2.3 Escala 1:3	153
4.4.2.4 Influencia del escalado en las propiedades mecánicas	159
4.4.3 Conjunto B 1:2 en servicio	162
4.4.3.1 Análisis estático de resistencia	162
4.4.3.1.1 Análisis estructural suponiendo un único sólido	163
4.4.3.1.2 Análisis estructural sin fricción	163
4.4.3.1.3 Análisis estructural con fricción pero sin desplazamiento de las piezas	164
4.4.3.1.4 Análisis estructural con fricción	164
4.4.3.2 Análisis de fatiga	165
4.4.3.2.1 Análisis de fatiga suponiendo un único sólido	165
4.4.3.2.2 Análisis de fatiga sin fricción	166
4.4.3.2.3 Análisis de fatiga con fricción pero sin desplazamiento de las piezas	167
4.4.3.2.4 Análisis de fatiga con fricción	167
4.4.3.3 Discusión de resultados	168
4.5 Caracterización de los agentes simuladores NR	169
4.5.1 Talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	170

4.5.2 Bicarbonato sódico (NaHCO_3)	170
4.5.3 Cloruro sódico (NaCl)	171
4.5.4 Cloruro de Cesio (CsCl).....	172
4.5.5 Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)	173
4.5.6 Fosfato potásico (KH_2PO_4)	173
4.5.7 Comparativa de los tamaños de partículas de los NR utilizados	174
4.6 Detección de la pluma de contaminante.....	175
4.7 Tiempo de vuelo de las partículas	180
4.7.1 Talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	181
4.7.2 Bicarbonato sódico (NaHCO_3)	181
4.7.3 Cloruro de cesio (CsCl)	181
4.7.4 Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)	182
4.7.5 Fosfato potásico (KH_2PO_4)	183
4.7.6 Estudio comparativo de los resultados. TOF de los simuladores NR.....	184
4.8 Ensayos de interacción contaminante – niebla. Puesta a punto	186
4.8.1 Bicarbonato sódico (NaHCO_3)	187
4.8.2 Talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$).....	192
4.9 Efectividad del sistema de contramedida.....	195
4.9.1 Simuladores hidrofílicos	196
4.9.1.1 Bicarbonato sódico (NaHCO_3).....	197
4.9.1.2 Cloruro de cesio (CsCl)	197
4.9.1.3 Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)	198
4.9.1.4 Fosfato potásico (KH_2PO_4)	199
4.9.2 Simulador hidrofóbico.....	200
4.9.2.1 Talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	201
4.10 Caracterización de boquillas empleadas	204
4.10.1 Análisis de las piezas en servicio	206
4.10.2 Variación de durezas de la pieza en servicio	210
4.10.3 MO de la pieza en servicio	212
5. Conclusiones	215
6. Líneas futuras	217
7. Bibliografía	219

Índice de tablas

Tabla I. Propiedades generales de los radioisótopos susceptibles de utilización como RDD [52].	14
Tabla II. Propiedades de los simuladores NR preseleccionados proporcionados por el proveedor Sigma – Aldrich en su ficha de seguridad.	16
Tabla III. Propiedades fisicoquímicas de agentes de guerra clásicos genéricos [55-57].	17
Tabla IV. Propiedades de los diferentes agentes químicos y sus sustitutos [55].	18
Tabla V. Resumen de las propiedades de cada uno de los medios de extinción más destacados de cada agente así como la clase de fuego para los cuales están más recomendados.	27
Tabla VI. Estudio teórico comparativo de parámetros clave de las nieblas de los diferentes modelos de boquilla a las diferentes escalas [90, 91].....	40
Tabla VII. Características y aplicaciones de la serie AA 6xxx.	44

Tabla VIII. Características y aplicaciones de la serie AA 7XXX.....	44
Tabla IX. AA 6082. Composición química fijada por la normativa y garantizada por el fabricante.....	88
Tabla X. Valores mínimos de las propiedades mecánicas para barras de 150 - 200mm de AA 6082 - T6 [101].	88
Tabla XI. Control dimensional de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6.	91
Tabla XII. Control dimensional de las probetas transversales de AA 6082 - T6.....	92
Tabla XIII. Resultados de los ensayos de tracción de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6.	93
Tabla XIV. Resultados de los ensayos de tracción de las probetas transversales AA 6082 - T6.	93
Tabla XV. AA 7075. Composición química dada por el fabricante.....	103
Tabla XVI. Valores mínimos de las principales propiedades mecánicas en función del diámetro de la barra recogidos en la normativa UNE - EN 755 - 2 [101] de la AA 7075 - T6.	103
Tabla XVII. Características mecánicas dadas por el fabricante. AA 7075 - T6.....	104
Tabla XVIII. Control dimensional de las probetas longitudinales de AA 7075 - T6.....	106
Tabla XIX. Control dimensional probetas transversales AA 7075 - T6.	107
Tabla XX. Resultados ensayos de tracción para las probetas longitudinales AA 7075 - T6.....	108
Tabla XXI. Resultados ensayos de tracción para las probetas transversales AA 7075 - T6.	108
Tabla XXII. Propiedades básicas de las aleaciones utilizadas por el programa SolidWorks [112].....	116
Tabla XXIII. Comparativa de los resultados principales obtenidos en las simulaciones del concepto de boquilla B.	137
Tabla XXIV. Comparativa de los resultados obtenidos en las simulaciones de la boquilla F.	161
Tabla XXV. Propiedades básicas del aluminio utilizado para las simulaciones con ANSYS [92].	162
Tabla XXVI. Diámetros medios de cada simulador seleccionado obtenidos de los histogramas mostrados.....	175
Tabla XXVII. Resumen de los tamaños y S_{geo} medios de cada uno de los simuladores seleccionados frente al TOF de las partículas medido.	184
Tabla XXVIII. Tiempos considerados para los ensayos de descontaminación.....	196
Tabla XXIX. Comparativa de dureza Vicker entre las diferentes piezas estudiadas.....	211

Índice de figuras

Figure 1. Alloys with best preselected qualities. Yield strength higher than 270 MPa, low density, price and good behaviour at high temperatures and against the water.	b
Figure 2. Estructural strength analysis of the top_flage. Scale 1:1 in AA 6061 - T6 and internal pressure of 2.5 MPa.	c
Figure 3. Areas of the part of nozzle where FS is less than 1 for the conditions and material selected.	c
Figure 4. VM tensile generated at nozzle B 1:2 in normal operation at 2.5 MPa in AA 7075 - T6, suppose a free movement between the different parts of the nozzle.....	c
Figure 5. Detail of the VM tensile on the nozzle B 1:2 of AA 7075 - T6 with an internal pressure of 2.5 MPa.....	c
Figure 6. Detail of the time of life of the nozzle B 1:2 of AA 7075 - T6 pressure 2.5 MPa.	c
Figure 7. Detail of the piece with the lowest SF (0.4), at the end of its useful life (9 years).	c
Figure 8. Variation of the size distribution of surrogates selected (diameter 50%, 10% and 90%).	d
Figure 9. Graphical representation of the relationships between the TOF and S_{geo}	d

Figure 10. Evolution of the CsCl explosion, the subsequent fog dispersion and the deposition of the aerosols by the effect of gravity.....	e
Figure 11. Ineffective cleaning of $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	e
Figure 12. Cleaning of $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ with a water mist with a 1 % of isopropanol.	e
Figura 13. Aleaciones con las mejores cualidades preseleccionadas. Límites elásticos superiores a 270 MPa, baja densidad, precio, buen comportamiento a elevadas temperaturas y frente al agua.....	b
Figura 14. Análisis de tensiones de la pieza más sensible, top_flage, a escala 1:1 en AA 6061 – T6 suponiendo una presión interna de 2.5 MPa.....	c
Figura 15. Zonas donde en FS es menor de 1 para las condiciones y material seleccionado. En este caso se supera el límite elástico del material.	c
Figura 16. Tensiones generadas en la boquilla B 1:2 en funcionamiento normal a 2.5 MPa en AA 7075 – T6, suponiendo un movimiento libre de las piezas seleccionadas.	c
Figura 17. Detalle de la zona donde se produce una mayor acumulación de tensiones.	c
Figura 18. Detalle de la vida útil de la boquilla B 1:2 de AA 7075 – T6 sometida a una presión de 2.5 MPa libre de fricciones.	c
Figura 19. Detalle de la pieza de menor factor de seguridad, 0.4, al término de su vida útil (9 años).....	c
Figura 20. Variación de la distribución de tamaños con la naturaleza del material (diámetro 50 %, 10 % y 90 %).	d
Figura 21. Representación gráfica de las relaciones entre el TOF y S_{geo}	d
Figura 22. Evolución de la explosión de CsCl, la dispersión de niebla posterior y la deposición de la misma por efecto de la gravedad.	e
Figura 23. Limpieza ineficaz del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	e
Figura 24. Limpieza del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ con una niebla al 1 % de isopropanol.....	e
Figura 25. Versatilidad esperada del sistema de contramedida COUNTERFOG.	3
Figura 26. Esquema de los ataques y accidentes más destacados en los que están involucrados algún tipo de agente NRBQ.	9
Figura 27. Actividad de distintas fuentes radiactivas [50].....	14
Figura 28. Actividades de radionucléidos empleados industrialmente [51].	14
Figura 29. Tabla de isótopos (Z vs N [52]).	15
Figura 30. Detalle de isótopos (Figura 29) en la zona de interés del I y Cs [52].	15
Figura 31. Estructuras de diferentes CWA y sus sustitutos propuestos [55].	19
Figura 32. Estructuras de la HD y sus sustitutos propuestos [55].	19
Figura 33. Tetraedro del fuego.	24
Figura 34. Esquema del COUNTERFOG – Lab [93].	33
Figura 35. Esquema de la disposición de los equipos dentro del COUNTERFOG – Lab.	34
Figura 36. Equipos y sistemas de control del COUNTERFOG - Lab. a) Sala 1 del laboratorio con boquilla F 1:2 instalada. b) Sala 3, con humectadora y deshumectadora, bomba de calor y bomba refrigeradora. c) Sistema de control del circuito de presión y detectores. d) Cuadro eléctrico, sistema de control de filtros y sistemas de adquisición de datos. e) Sala de equipos a presión con un compresor, depósito pulmón, dos depósitos presurizados de agua, compresor de aire y el sistema de canalizaciones de agua y aire.	34
Figura 37. Instalación del laboratorio portátil COUNTERFOG y dotación de los principales servicios. a) Preparación del terreno. b) Instalación del laboratorio. c) Incorporación de accesos bajo normativa al laboratorio [94, 95]. d) Dotación de electricidad al COUNTERFOG - Lab.	35
Figura 38. Sistemas de detección y otras implementaciones. a) Caudalímetro y sistemas de medición y control de presión. b) Detectores de gases de la sala 2. c) Detectores de humo. d) Sistema de recogida de efluentes. e) Filtros de limpieza de salas de trabajo.	36
Figura 39. Modelos iniciales de boquillas propuestos en base a la bibliografía [89].	38

Figura 40. Modelos preliminares de boquillas generadoras de niebla. Izquierda modelo B con mezclado de tres fluidos en el interior de la boquilla. Derecha modelo F con mezclado de dos fluidos en el interior de la boquilla y nanopartículas en el exterior [90].	39
Figura 41. Simulación del comportamiento de los fluidos de la boquilla B 1:2 a 1 MPa de H ₂ O y 2 MPa de aire [91]. Presenta menores caudales de agua así como menores tamaño de gota y una distribución de tamaño de gota más homogénea.	42
Figura 42. Simulación del comportamiento de los fluidos de la boquilla B 1:2 a 2 MPa de H ₂ O y 1 MPa de aire [91]. Un aumento de la presión de agua y reducción de la presión de aire aumenta el caudal de agua y el tamaño de la gota de agua generado. Además, en esta combinación de presiones existe una mayor dispersión en el tamaño de gota.	42
Figura 43. Modelo rediseñado por BPE.	43
Figura 44. Imagen de la boquilla de BPE instalada en el Laboratorio COUNTERFOG.	43
Figura 45. Torno de CNC del taller del CIEMAT.	46
Figura 46. Centro de CNC de la empresa APM.	46
Figura 47. Componentes de la boquilla B a tamaño original, escala 1:1.	48
Figura 48. Componentes de la boquilla F a tamaño original, escala 1:1.	48
Figura 49. Despiece de la boquilla B 1:2.	49
Figura 50. Despiece de la boquilla F 1:2.	50
Figura 51. Componentes de la boquilla B 1:3.	51
Figura 52. Componentes de la boquilla F 1:3.	52
Figura 53. Boquilla B escala 1:3 y escala 1:2.	52
Figura 54. Boquilla F escala 1:3, escala 1:2 y escala 1:1, respectivamente.	52
Figura 55. Pistola de gravedad cargada de Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ y con 0.2 MPa de presión de aire.	55
Figura 56. Disposición de los primeros globos grandes en la estructura de soporte de las boquillas. a) Momento inicial de colocación del dispositivo de explosión. b) Momento previo a la explosión del dispositivo de dispersión.	56
Figura 57. Sistema de explosión definitivo seleccionado, centrado en la sala para favorecer una explosión tridimensional y un reparto homogéneo del producto en la sala.	56
Figura 58. Imagen de explosiones fallidas unidireccionales del globo cargado con el producto a dispersar. a) Explosión hacia atrás contra las paredes del laboratorio. b) Caída directa al suelo del material a dispersar.	56
Figura 59. Interacción de una solución acuosa de alcohol isopropílico con superficies de distinta polaridad, hidrofóbicas e hidrofílicas [107].	58
Figura 60. Imagen de los ensayos de Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ en agua en presencia de los diferentes aditivos.	58
Figura 61. Difracción de la luz natural causada por la dispersión de la nube de polvo en la atmósfera.	63
Figura 62. Sistema CCTV acoplado con un sistema laser. Las imágenes muestran la difracción láser.	63
Figura 63. Imagen obtenida del Counterfog-Lab gracias al sistema CCTV y la incorporación de un foco de luz LED.	63
Figura 64. Contador de partículas "Particle Plus".	63
Figura 65. Estado general del esfuerzo [115].	65
Figura 66. Zonas de seguridad en función de las diferentes aproximaciones teóricas. La teoría de Von Mises es la más conservadora.	66
Figura 67. Selección del tipo de junta tórica a utilizar en función del uso [90].	71
Figura 68. Posición inicial de las juntas frente a la posición final de las mismas en base a la normativa aplicable. Se muestra en concreto la boquilla B con la carcasa y entrada de agua modificadas del diseño final [91].	72
Figura 69. Modificación de la carcasa exterior para la boquilla B [91].	73
Figura 70. Modificación de los ángulos de las piezas para su ajuste en fabricación [91].	73

Figura 71. Modificación de las sujeciones de la pieza helicoidal del modelo F [91].	74
Figura 72. Pruebas de funcionamiento del primer prototipo fabricado escala 1:1. a) Primeras pruebas con una P_{H_2O} de 1.5 MPa y un P_{aire} de 2.8 MPa. b) Pruebas con una P_{H_2O} de 0.5 MPa y un P_{aire} de 0.5 – 0.8 MPa.	75
Figura 73. Entrada de aire B escala 1:2.	77
Figura 74. Entrada de aire F escala 1:2.	77
Figura 75. Resistencia a la tracción de los diferentes materiales existentes [109].	78
Figura 76. Módulo de Young frente a densidad [109].	79
Figura 77. Resistencia a la tracción frente a densidad [109].	79
Figura 78. Módulo de Young frente a la resistencia a la tracción [109].	80
Figura 79. Resistencia a la tracción en función de la temperatura de trabajo [109].	80
Figura 80. Facilidad de manufactura frente al coste económico del material [109].	81
Figura 81. Comportamiento del material frente a la corrosión en presencia de agua [109].	81
Figura 82. Representación esquemática del modelo de tensiones generadas en AA 6061 con límite elástico de 55 MPa sometido a un esfuerzo de 5 MPa en el 50 % de la tapa.	83
Figura 83. Representación esquemática del modelo de tensiones generadas en AA 6061 con límite elástico de 55 MPa sometido a un esfuerzo de 3 MPa en el 50 % de la tapa.	83
Figura 84. Límite elástico en metales superior a 270 MPa frente al coste del material.	84
Figura 85. Límite elástico en metales superior a 270 MPa frente a la densidad del material.	85
Figura 86. Influencia de la temperatura en el límite elástico. Selección de los materiales con límite elástico superior a 270 MPa.	85
Figura 87. Influencia de la presencia de agua en los materiales seleccionados. Límites elásticos superiores a 270 MPa y un comportamiento frente al agua excelente.	86
Figura 88. Aleaciones con las mejores cualidades preseleccionadas. Límites elásticos superiores a 270 MPa, baja densidad, precio, buen comportamiento a elevadas temperaturas y frente al agua.	87
Figura 89. Micrografía del material primario AA 6082 - T6. a) MO plano longitudinal de la barra de aluminio 50x. b) MO plano longitudinal del material 200x. c) MO plano transversal de la barra de aluminio 50x. d) MO plano transversal del material a 200x.	89
Figura 90. Influencia de la temperatura y de la orientación del grano en el límite elástico de la AA 6082 - T6.	93
Figura 91. Influencia de la temperatura y de la orientación del grano en la resistencia máxima de la AA 6082 - T6.	93
Figura 92. Influencia de la temperatura y de la orientación del grano en el alargamiento unitario de la AA 6082 - T6.	94
Figura 93. Influencia de la temperatura y de la orientación del grano en el alargamiento total de la AA 6082 - T6.	94
Figura 94. Variación de la estricción en función de la temperatura y de la orientación del grano de la AA 6082 - T6.	94
Figura 95. Macrografía de la rotura de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6.	96
Figura 96. Macrografía de la rotura de las probetas transversales de AA 6082 - T6.	96
Figura 97. Fractografía de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6 a 25 °C.	97
Figura 98. Fractografía de las probetas transversales de AA 6082 - T6 a 25 °C.	98
Figura 99. Fractografía de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6 a 150 °C.	100
Figura 100. Fractografía de las probetas transversales de AA 6082 - T6 a 150 °C.	101
Figura 101. SEM-EDX de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6 a 25 °C.	102
Figura 102. SEM-EDX de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6 a 150 °C.	102
Figura 103. SEM-EDX de las probetas transversales de AA 6082 - T6 a 25 °C.	102
Figura 104. SEM-EDX de las probetas transversales de AA 6082 - T6 a 150 °C.	102

Figura 105. Micrografía del material primario AA 7075 - T6. a) MO plano longitudinal de la barra de aluminio 50x. b) MO plano longitudinal de la barra de aluminio 200x. c) MO plano transversal de la barra de aluminio 50x. d) MO plano transversal de la barra de aluminio 200x.	104
Figura 106. Influencia de la orientación y de la temperatura en el límite elástico de las probetas de AA 7075 - T6.	110
Figura 107. Influencia de la orientación y de la temperatura en la resistencia máxima de las probetas de AA 7075 - T6.....	110
Figura 108. Influencia de la orientación y de la temperatura en el alargamiento unitario de las probetas de AA 7075 - T6.....	110
Figura 109. Influencia de la orientación y de la temperatura en el alargamiento total de las probetas de AA 7075 - T6.	110
Figura 110. Variación de la estricción en función de la orientación de las probetas y de la temperatura en la AA 7075 - T6.	110
Figura 111. Macrografía de la rotura de las probetas longitudinales de AA 7075 - T6.....	112
Figura 112. Macrografía de la rotura de las probetas transversales de AA 7075 - T6.....	112
Figura 113. Diagrama de fases Al-Mg-Si [128].	113
Figura 114. Al-Mg-Si Proyección sólida [128].	113
Figura 115. Diagrama de fases ternario Al-Mg-Zn [128].	114
Figura 116. Diagrama de fases ternario Al - Zn - Mg [128] a 400 y 200 °C.	114
Figura 117. Resumen de los resultados de los ensayos a tracción para los distintos aluminios a las diferentes temperaturas de ensayo en función de la dirección de grano de la probeta.....	115
Figura 118. Esquema básico del modelo de boquilla B.	118
Figura 119. Análisis de tensiones de input_water_insert escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 4.4.....	119
Figura 120. Análisis de tensiones de top_flaje escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 0.6.	119
Figura 121. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 13.3.	120
Figura 122. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 30.6.	120
Figura 123. Análisis de tensiones de inlet_nozzle escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 32.7.	121
Figura 124. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 48.2.	121
Figura 125. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 25.5.	122
Figura 126. Análisis de tensiones de nozzle_insert escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 19.9.	122

Figura 127. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 4.0.	123
Figura 128. Análisis de tensiones de input_air escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 57.9.	123
Figura 129. Análisis de tensiones de inlet_particles escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 51.6.	124
Figura 130. Análisis de tensiones de input_water_Insert escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 13.8.	125
Figura 131. Análisis de tensiones de top_flaje escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 2.6.	125
Figura 132. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 31.9.	126
Figura 133. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 53.3.	126
Figura 134. Análisis de tensiones de inlet_nozzle escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 75.1.	127
Figura 135. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 93.2.	127
Figura 136. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 80.5.	128
Figura 137. Análisis de tensiones de nozzle_insert escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 11.3.	128
Figura 138. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 6.6.	129
Figura 139. Análisis de tensiones de input_air escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 36.3.	129
Figura 140. Análisis de tensiones de inlet_particles escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 49.3.	130

Figura 141. Análisis de tensiones de input_water_Insert escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 19.0.	131
Figura 142. Análisis de tensiones de top_flaje escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 5.2.	131
Figura 143. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 59.1.	132
Figura 144. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 47.0.	132
Figura 145. Análisis de tensiones de inlet_nozzle escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 52.5.	133
Figura 146. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 73.4.	133
Figura 147. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 80.5.	134
Figura 148. Análisis de tensiones de nozzle_insert escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 39.3.	134
Figura 149. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 8.7.	135
Figura 150. Análisis de tensiones de input_air escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 63.4.	135
Figura 151. Análisis de tensiones de inlet_particles escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 64.3.	136
Figura 152. Esquema básico del modelo de boquilla F.....	139
Figura 153. Análisis de tensiones de inlet_water escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 4.9.	140
Figura 154. Análisis de tensiones de top_flaje escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 0.6.	141
Figura 155. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 17.9.	141

Figura 156. Análisis de tensiones de adapter_swirl escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 5.9.	142
Figura 157. Análisis de tensiones de swirl_modif escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 14.6.	142
Figura 158. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 39.6.	143
Figura 159. Análisis de tensiones de inlet_nozzler escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 14.5.	143
Figura 160. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 31.7.	144
Figura 161. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 50.5.	144
Figura 162. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 4.0.	145
Figura 163. Análisis de tensiones de input_air escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 51.6.	145
Figura 164. Análisis de tensiones de Inlet_particles escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 59.6.	146
Figura 165. Análisis de tensiones de inlet_water escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 13.6.	147
Figura 166. Análisis de tensiones de top_flage escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 1.2.	147
Figura 167. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 31.2.	148
Figura 168. Análisis de tensiones de adapter_swirl escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 12.9.	148
Figura 169. Análisis de tensiones de swirl_modif escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 25.9.	149

Figura 170. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 71.4.	149
Figura 171. Análisis de tensiones de inlet_nozzle escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 37.7.	150
Figura 172. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 51.3.	150
Figura 173. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 85.6.	151
Figura 174. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 6.6.	151
Figura 175. Análisis de tensiones de input_air escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 34.2.	152
Figura 176. Análisis de tensiones de inlet_particles escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 104.	152
Figura 177. Análisis de tensiones de inlet_water escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 19.6.	153
Figura 178. Análisis de tensiones de top_flage escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 5.4.	154
Figura 179. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 29.8.	154
Figura 180. Análisis de tensiones de adapter_swirl escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 25.6.	155
Figura 181. Análisis de tensiones de swirl_modif escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 22.7.	155
Figura 182. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 65.4.	156
Figura 183. Análisis de tensiones de inlet_nozzle escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 31.2.	156

Figura 184. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 43.0.	157
Figura 185. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 91.2.	157
Figura 186. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 7.7.	158
Figura 187. Análisis de tensiones de input_air escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 36.9.	158
Figura 188. Análisis de tensiones de Inlet_particles escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 87.9.	159
Figura 189. Tensiones generadas en la boquilla B 1:2 en funcionamiento normal a 2.5 MPa, suponiendo un contacto sólido de las piezas.	163
Figura 190. Detalle de la zona donde se produce una mayor acumulación de tensiones.	163
Figura 191. Tensiones generadas en la boquilla B 1:2 en funcionamiento normal a 2.5 MPa, suponiendo un movimiento libre de las piezas seleccionadas.	164
Figura 192. Detalle de la zona donde se produce una mayor acumulación de tensiones.	164
Figura 193. Tensiones generadas en la boquilla B 1:2 en funcionamiento normal a 2.5 MPa, suponiendo fricción pero sin desplazamiento de las piezas seleccionadas.	164
Figura 194. Detalle de la zona donde se produce una mayor acumulación de tensiones.	164
Figura 195. Tensiones generadas en la boquilla B 1:2 en funcionamiento normal a 2.5 MPa, suponiendo fricción entre piezas.	165
Figura 196. Detalle de la zona donde se produce una mayor acumulación de tensiones.	165
Figura 197. Horas de vida útil de la boquilla B 1:2 sometida a una presión de 2.5 MPa con contacto sólido entre piezas. Mínimo de $1.709 \cdot 10^7$ h aproximadamente 2000 años.	166
Figura 198. Factor de seguridad al término de la vida útil de la boquilla.	166
Figura 199. Detalle de la pieza de menor FS al término de su vida útil. FS = 0.9.	166
Figura 200. Horas de vida útil de la boquilla B 1:2 sometida a una presión de 2.5 MPa libre de fricciones. Mínimo de 9 años.	166
Figura 201. Detalle de la pieza que presenta una menor vida útil.	166
Figura 202. Factor de seguridad al término de la vida útil de la boquilla.	167
Figura 203. Detalle de la pieza de menor FS. 0.4 al término de su vida útil.	167
Figura 204. Horas de vida útil de la boquilla B 1:2 sometida a 2.5 MPa con fricción pero sin desplazamiento. Mínimo de 19 años.	167
Figura 205. Detalle de la pieza que presenta una menor vida útil.	167
Figura 206. Factor de seguridad al término de la vida útil de la boquilla.	167
Figura 207. Detalle de la pieza de menor FS, siendo este de 0.5 al término de su vida útil.	167
Figura 208. Detalle de la pieza que presenta una menor vida útil. El mínimo de horas de vida útil de esta boquilla B 1:2 sometida a ciclos de presión de 2.5 MPa es de más de 12 años.	168
Figura 209. Factor de seguridad al término de la vida útil de la boquilla.	168
Figura 210. Detalle de la pieza de menor FS, 0.5 al término de su vida útil.	168
Figura 211. Nozzle_insert, pieza más débil en un funcionamiento normal de la boquilla.	169
Figura 212. Top_flage, pieza más débil en un comportamiento anormal de la boquilla.	169
Figura 213. $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ en estado bruto.	170

Figura 214. Distribución del tamaño de partícula del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ y valores de diámetro en base al porcentaje de partículas medido.	170
Figura 215. Estado inicial del NaHCO_3 proporcionado por Sigma-Aldrich.	171
Figura 216. Apariencia del NaHCO_3 una vez molida la muestra.	171
Figura 217. Distribución de tamaño de partícula de NaHCO_3 y diámetros característicos.....	171
Figura 218. Aspecto del NaCl antes del proceso de molienda.	171
Figura 219. Muestra procesada de NaCl	171
Figura 220. Distribución de tamaño de partículas del compuesto NaCl y sus diámetros característicos.....	172
Figura 221. Estado inicial del CsCl	172
Figura 222. Aspecto del CsCl tras la molienda.	172
Figura 223. Histograma de la distribución de partículas y línea de frecuencias del compuesto CsCl , así como sus diámetros característicos de la muestra de CsCl medida.	172
Figura 224. Estado inicial del simulador $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	173
Figura 225. Muestra de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ tras el proceso de molienda pertinente.	173
Figura 226 Distribución de partículas de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y diámetros característicos extraídos del mismo.	173
Figura 227. Estado inicial del KH_2PO_4	174
Figura 228. Aspecto del KH_2PO_4 una vez molido.	174
Figura 229. Distribución del tamaño de partícula del KH_2PO_4 y valores de diámetros asociados.	174
Figura 230. Representación del diámetro al 50 % de los NR seleccionados y de su consecuente error al 10 % y 90 %.	175
Figura 231. Diagrama de cajas y bigotes de los simuladores seleccionados. Las cajas muestran los cuartiles de 25 – 50 % y 50 – 75 %. Con los bigotes se han representado los valores de 10 – 90 %, así como los valores atípicos máximos y mínimos.	175
Figura 232. Evolución de la nube de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	177
Figura 233. Evolución de la nube de NaHCO_3	178
Figura 234. Evolución de la nube de polvo de NaCl	179
Figura 235. Evolución de la nube dispersada de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	181
Figura 236. Evolución de las partículas de NaHCO_3 dispersadas.	181
Figura 237. Evolución de las partículas de CsCl dispersadas.	183
Figura 238. Evolución de las partículas de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ dispersadas.	183
Figura 239. Evolución de las partículas de KH_2PO_4 dispersadas en el tiempo.....	183
Figura 240. Representación gráfica de las relaciones entre el TOF y S_{geo}	185
Figura 241. Esquema de proceso seguido en los ensayos preliminares de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ y NaHCO_3	186
Figura 242. Esquema de los ensayos preliminares monitorizados.	187
Figura 243. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando NaHCO_3 como agente NR y la boquilla B 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $H = 90\text{ }%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 0.6\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}} = 0.05\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$	188
Figura 244. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando NaHCO_3 como agente NR y la boquilla B 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $H = 90\text{ }%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.2\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}}$ no registrado. Por debajo del valor mínimo del caudalímetro.	189
Figura 245. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando NaHCO_3 como agente NR y la boquilla F 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $H = 90\text{ }%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 0.6\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}} = 0.05 - 0.09\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$	190
Figura 246. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando NaHCO_3 como agente NR y la boquilla F 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $H = 90\text{ }%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.3\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}} = 0.04 - 0.07\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$	191

Figura 247. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ como agente NR y la boquilla B 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $H = 90\%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 0.6\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}} = 0.05\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$	193
Figura 248. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ como agente RN y la boquilla B 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $H = 90\%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.2\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}}$ no registrado al estar por debajo del valor mínimo.	194
Figura 249. Evolución de la explosión de NaHCO_3 , la dispersión de niebla posterior con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8\text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30\text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.....	198
Figura 250. Evolución de la explosión de CsCl , la dispersión de niebla posterior con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8\text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30\text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.....	198
Figura 251. Evolución de la explosión de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, la dispersión de niebla posterior con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8\text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30\text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.....	199
Figura 252. Evolución de la explosión de KH_2PO_4 , la dispersión de niebla posterior con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8\text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30\text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.....	200
Figura 253 Evolución de la explosión de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, la dispersión de niebla posterior con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8\text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30\text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.....	202
Figura 254 Evolución de la explosión de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, la dispersión de niebla posterior al 0.5 % de Bio – Sel con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8\text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30\text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.....	202
Figura 255 Evolución de la explosión de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, la dispersión de niebla posterior al 1 % de isopropanol con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8\text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30\text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.....	203
Figura 256. Boquilla B 1:2 tras dos años de experimentación.	204
Figura 257. Boquilla F 1:2 tras dos años de experimentación.	205
Figura 258. Acumulación de residuos poliméricos de las tuberías de entrada de agua.	206
Figura 259. Rotura de la entrada de aire debido a un mal apriete de la boquilla.....	206
Figura 260. Detalle de la corrosión interna de la carcasa superior.	207
Figura 261. Detalle de la corrosión por picadura de la carcasa superior.....	207
Figura 262. Zona de mayor corrosión mostradas en las imágenes Figura 260 y Figura 261.	208
Figura 263. Diagrama de Poubaix del aluminio realizado con el programa Medusa [116].....	208
Figura 264. Efecto de la temperatura en el diagrama de Poubaix. Gráfico a $10\text{ }^\circ\text{C}$ y $40\text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente.	209
Figura 265. Diagrama de Poubaix del aluminio a 25°C en presencia de carbonatos y cloruros.	209
Figura 266. Micrografías de las diferentes zonas de las piezas mecanizadas sin uso y con uso a 200x.	212
Figura 267. Micrografía de la estructura de la barra de partida de 50 mm de AA 7075 – T6.....	213

Acrónimos

Acrónimo	Definición
a.C.	Antes de Cristo
AA	Aleación de Aluminio
ACB	Acería Compacta Bizkaia
ADM	Armas de Destrucción Masiva
ADN	Ácido desoxirribonucleido
APM	Alta Precisión de Mecanizado
APS	Aerodynamic Particle Sizer
ASTM	American Society of Testing Materials
B 1:2	Modelo boquilla B escala 1:2
B 1:3	Modelo boquilla B escala 1:3
BPE	BPE International. Centro Alemán de investigación.
CCTV	Close Circuit TeleVision
CEES	2-chloroethyl ethyl sulfide / Sulfuro de 2-cloroetil etilo
CENTCOM	Central Command
CEPS	2-chloroethyl phenyl sulfide / Sulfuro de 2-cloroetil fenilo
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional
CIEMAT	Centro Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CNC	Control Numérico Computarizado
COUNTERFOG	Device for large scale fog decontamination
COUNTERFOG-Lab	Laboratorio COUNTERFOG
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
CWA	Chemical Warfare Agent
DFP	Diisopropyl fluorophosphates / Diisopropil fluorofosfonato
DIMP	Diisopropyl methylphosphonate / Diisopropil metilfosfonato
DMMP	Dimethyl methylphosphonate / Dimetil metilfosfonato
DPGME	Dypropyleneglycol monomethyl ether / Éter monometílico de propilenglicol
EEUU	Estados Unidos
F 1:2	Modelo boquilla F escala 1:2
F 1:3	Modelo boquilla F escala 1:3
FPS	Fluorescence Particle Sizer
FS	Factor de Seguridad
GA	Tabún
G-A	Agentes G
GB	Sarín
GC	Somán
GICNT	Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism
GM	Guerra Mundial

Acrónimo	Definición
HD	Gas Mostaza
HV	Dureza Vicker
INTERPOL	Organización Internacional de Policía Criminal
IR	Infrarroja
ITDB	Incident and Trafficking Database
L	Lewisita
Malatión	1,2-bis(ethoxycarbonyl ethyl] o,o-dimethyl phosphorodithioate / 2-[(dimetoxifosforotioil)sulfanil]butanodioato de dietilo
MO	Microscopía Óptica
MORC	Materials Out of Regulatory Control – Materiales fuera del control regulador
MS	Methyl 2-hydroxybenzoate / Salicilato de Metilo
NFPA	National Fire Protection Associaton
NR	Nuclear y Radiactivo
NRBQ	Nuclear, Radiológico, Biológico y Químico
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
ONU	Organización de las Naciones Unidas o Naciones Unidas (NN.UU.)
PAO	Phenylarsine oxide / Óxido de fenilarsina
Paratión	o,o-diethyl-o,p-nitrophenyl thiophosphate / O,O-dietil-O-4-nitrofeniltiofosfato
PR	Protección Radiológica
PRL	Prevención de Riesgos Laborales
RD	Real Decreto
RDD	Radiological Dispersion Device
RED	Radiological Exposition Device
RX	Rayos X
SEM	Scanning Electron Microscope
SEM-EDX	Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray spectroscopy
SMD	Sauter Mean Diameter
STEM-WDX	Scanning Transmission Electron Microscope – Wavelength Dispersive X-ray
STR	Universidad de Strathclyde
TEM	Microscopio Electrónico de Transmisión
TEP	Triethyl Phosphate / Trietil fosfato
TIC	Toxic Industrial Chemicals
TOF	Time of Flight
UAH	Universidad Alcalá de Henares
UE	Unión Europea
URSS	Unión de Repúblicas Socialista Soviéticas
VM	Von Mises
VX	S-[2-(Diisopropilamino)etil]metilfosfonotioato de O-etilo

0. Summary / Resumen

Water mist generating systems for safety and decontamination uses. Application to the nuclear-radiological scenario

0.1 Introduction

The social phenomenon of communication, known as globalization, has facilitated access to all kinds of information in a simple and anonymous way. This knowledge can be used improperly by groups with violent interests that try to spread the panic among the people. In order to evaluate the possible threat of an attack by this kind of groups, it must be considered that the use of radioactive sources and other types of chemical or biological compounds in research, agriculture, medical, industrial applications, etc., is becoming more popular and that could be used to spread the terror and the panic our society.

In light of these new threats, there are no countermeasures available that can respond quickly and automatically to mitigate the possible consequences. Therefore, the need arises to design and to implement new countermeasure systems that will act in the face of a CBRN emergency (Chemical, Biological, Radiological and Nuclear), even in the presence of fire. The proposed countermeasure system consists of a fog-generating nozzle with a micrometer droplet size dispersion that interacts with the dispersed aerosols, producing their precipitation.

The objectives of the present research work are mainly the selection of materials suitable for the production of the nozzles designed, which will require a theoretical study of the tensions generated and an assurance that the materials finally chosen are able to guarantee the integrity of the system regardless of the test conditions. In addition, this research pursue the cleaning of atmospheres contaminated with solid aerosols of CBRN surrogate agents. To carry out these tests it is necessary to select surrogates to be used and to establish an adequate and reproducible experimental process.

0.2 Material selection and simulations

0.2.1 Selection materials

Based on previous simulations of the nozzle's working conditions, it was established as a parameter design that the materials used in the manufacture of the nozzles must have a yield strength of more than 270 MPa.

Based on this parameter, a selection of materials was carried out using the Ces - Selector program, looking for materials with a minimum density, low economic cost, good properties against water, that could be easily mechanized, with good mechanical properties and capable of maintaining the properties at high temperatures (emergency temperature $T \sim 150$ °C).

Based on these design parameters, several Ashby's diagrams were carried out that led to the optimal selection of materials. Initially two alloys were selected:

- AA 6082 - T6, because of its good mechanical properties, the ease of mechanization, good corrosion resistance and the previous experience CIEMAT workshops have with this material.
- AA 7075 - T6, because of its high use and good mechanical properties by its density.

Figure 1 shows the situation of these alloys in a diagram of specific resistance. It is important to note that only Mg alloys have a higher specific strength for similar tensile strength values, but these alloys have higher costs, problems in the machining process and in corrosion resistance than Al alloys.

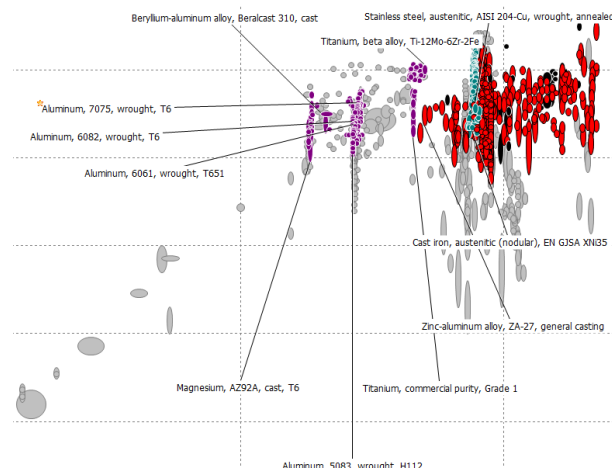


Figure 1. Alloys with best preselected qualities. Yield strength higher than 270 MPa, low density, price and good behaviour at high temperatures and against the water.

The base materials were characterized, in order to check that their values of tensile strength and yield strength are in concordance with the values fixed for the normative. In addition, in this point a tensile strength tests at high temperatures (150 °C) were done to know the influence of this parameter on the mechanical properties of the select alloys.

0.2.2 Structural analysis of the nozzles

Two programs were used for the modelling of the behaviour of the nozzles manufacture with these aluminium alloys:

- SolidWork for the individual modelling of all the parts of nozzles in case of anomalous behaviour of the system (Figure 2 and Figure 3)
- ANSYS for the simulation of the nozzle assembly under standard working conditions (Figure 4 - Figure 7).

These simulations identified the weakest parts of the design and calculated the Von Mises tensile that were generated in operation and their safety factor (FS).

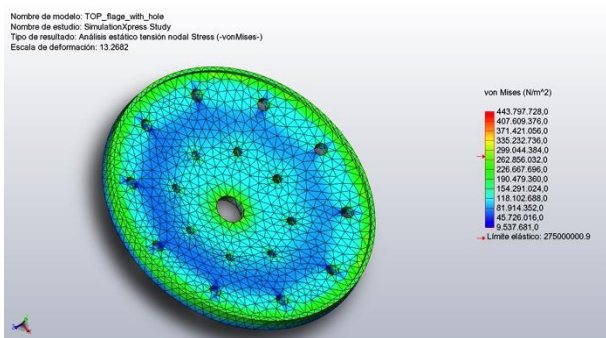


Figure 2. Estructural strength analysis of the top_flage. Scale 1:1 in AA 6061 - T6 and internal pressure of 2.5 MPa.

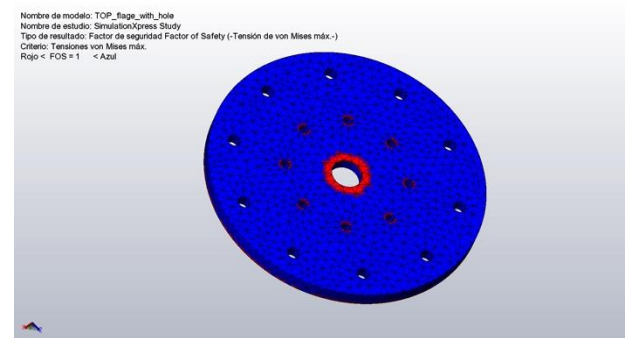


Figure 3. Areas of the part of nozzle where FS is less than 1 for the conditions and material selected.

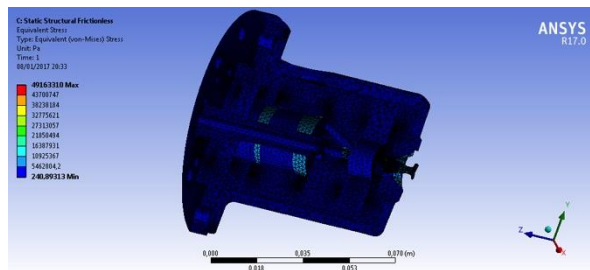


Figure 4. VM tensile generated at nozzle B 1:2 in normal operation at 2.5 MPa in AA 7075 - T6, suppose a free movement between the different parts of the nozzle.

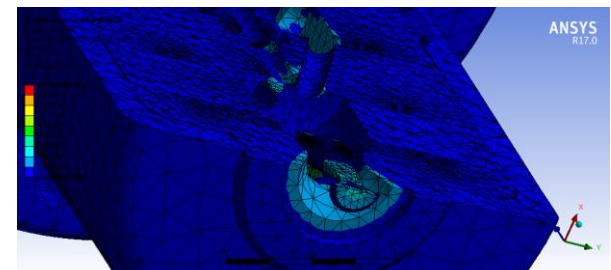


Figure 5. Detail of the VM tensile on the nozzle B 1:2 of AA 7075 - T6 with an internal pressure of 2.5 MPa.

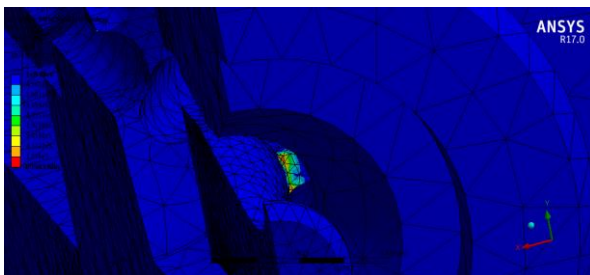


Figure 6. Detail of the time of life of the nozzle B 1:2 of AA 7075 - T6 pressure 2.5 MPa.

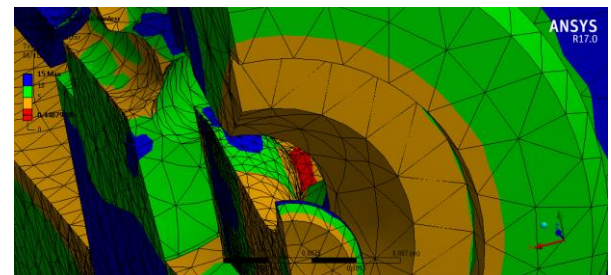


Figure 7. Detail of the piece with the lowest SF (0.4), at the end of its useful life (9 years).

The results obtained from successive simulations confirm that the selected AA 7075 - T6 alloy guarantees the integrity of the nozzle system in operation. It is important to point out that these simulations are ideal and it does not take into account the abrasion that can suffer the material or the corrosion.

0.3 Decontamination trials

0.3.1 Characterization of the pollutant

Prior to the performance of the relevant decontamination tests, the selected NR surrogates were characterized. The results of the particle sizes measured for each of them (Figure 8), as well as their flight time (Figure 9), are shown below.

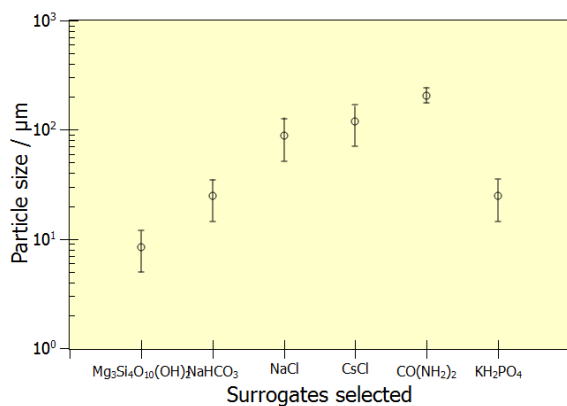


Figure 8. Variation of the size distribution of surrogates selected (diameter 50%, 10% and 90%).

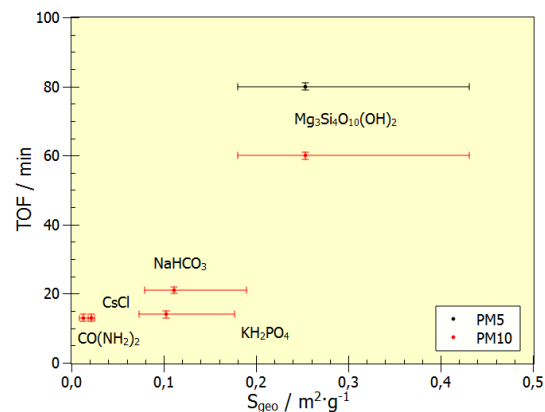


Figure 9. Graphical representation of the relationships between the TOF and S_{geo} .

0.3.2 Effectiveness of the countermeasure system

In order to check the operation of the cleaning system proposed in the COUNTERFOG project, several tests were carried out with different compounds selected according to their polarity. On the one hand, hydrophilic compounds such as NaHCO_3 , NaCl , CsCl , $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ and KH_2PO_4 were tested, and on the other hand, the hydrophobic compound of $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{12}(\text{OH})_2$ was tested too.

A representative example of decontamination test of hydrophobic compound is shown below (Figure 10). The evolution of the aerosols is been measured by the particle counter.

This graph shows the initial suspension of the pollutant, the fog dispersion of the countermeasure system and how after 17-18 min from the start of the trial the fog has been completely deposited, carrying away with it the dispersed particles of CsCl . In the previous characterization of the temporal evolution of the pollutant, residual dispersed

particles were still detected at 30 min, however in these tests after the application and precipitation of the fog, no particles are detected in the environment.

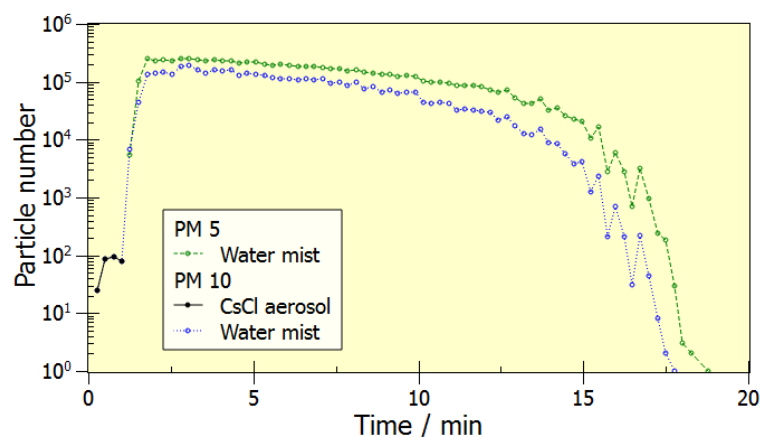


Figure 10. Evolution of the CsCl explosion, the subsequent fog dispersion and the deposition of the aerosols by the effect of gravity.

On the other hand, in applying the water mist, under the same conditions and with identical characteristics to the previous one, in presence of a solid hydrophobic an effective cleaning of the room it does not achieved as shown in Figure 11. For this reason, it was studied the effect of the use of different additives. These additives reduce the surface tension of the water drop in order to facilitate the sorption of the water for the particle of contaminant. As it can be seen in Figure 12, with the addition of 1% of isopropanol to the water mist, the optimal cleaning of the contaminated room is achieved.

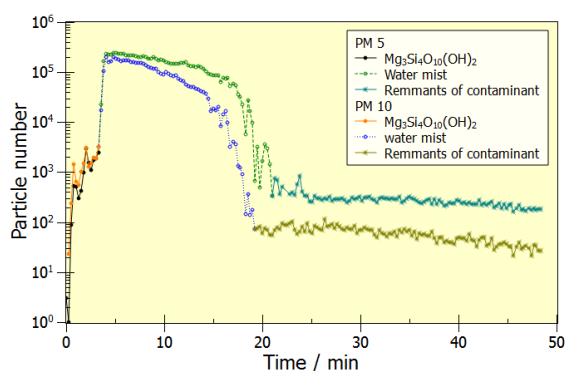


Figure 11. Ineffective cleaning of $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.

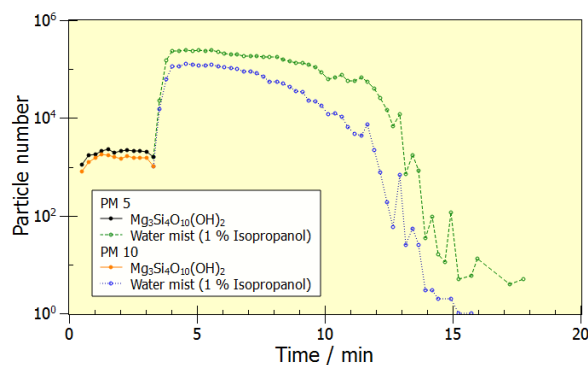


Figure 12. Cleaning of $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ with a water mist with a 1 % of isopropanol.

0.4 Conclusions

Based on the tests carried out, it has been demonstrated that the COUNTERFOG nozzle system is able to generate mists that dissolve and/or deposit solids dispersed in the environment, irrespective of their hydrophobic or hydrophobic character. With these cleaning the presence of CBRN agents in the air and their possible dispersion is reduced.

Sistemas generadores de niebla para usos en seguridad y descontaminación. Aplicación al escenario nuclear-radiológico

0.5 Introducción

El fenómeno social de comunicación, conocido como globalización, ha facilitado el acceso a toda clase de información de una forma sencilla y anónima. Este conocimiento puede ser utilizado de una forma inadecuada por parte de grupos con intereses violentos o de generar pánico en la sociedad. Para evaluar la posible amenaza de un ataque por este tipo de grupos hay que considerar que cada vez está más extendido el uso de fuentes radiactivas y otros tipos de compuestos químicos o biológicos en investigación, agricultura, aplicaciones médicas, industriales, etc., que son susceptibles de ser utilizados para generar el pánico o el terror en nuestra sociedad.

Ante estas nuevas amenazas, no se disponen de contramedidas que permitan responder de manera rápida y automática para mitigar las posibles consecuencias, por lo que surge la necesidad del diseño e implantación de nuevos sistemas contramedida que actúen ante una emergencia de carácter NRBQ (Nuclear, Radiológico, Biológico y Químico), incluso en posible presencia de fuego. El sistema contramedida planteado consiste en una boquilla generadora de niebla con una dispersión de tamaño de gota micrométrico que interacciona con los aerosoles dispersos, provocando su precipitación.

Los objetivos del presente trabajo de investigación son principalmente la selección de los materiales adecuados para la fabricación de las boquillas diseñadas, lo que requerirá un estudio teórico de las tensiones generadas y una demostración de que los materiales finalmente elegidos son capaces de garantizar la integridad del sistema independientemente de las condiciones de ensayo. Además, esta investigación persigue la limpieza de atmósferas contaminadas con aerosoles sólidos de agentes simuladores NRBQ. Para llevar a cabo estos ensayos es necesario seleccionar los simuladores a utilizar y establecer un proceso experimental adecuado y reproducible.

0.6 Selección de materiales y modelos

0.6.1 Selección de materiales

En base a simulaciones previas de las condiciones de trabajo de las boquillas, se estableció como parámetro de diseño que los materiales que se utilizaran en la fabricación de las boquilla han de presentar un límite elástico superior a 270 MPa.

A partir de este dato, se realizó una selección de materiales con el programa Ces – Selector buscando materiales con una mínima densidad, bajo coste económico, buenas propiedades frente al agua, que se mecanice con facilidad, que presente buenas propiedades mecánicas y que éstas se mantengan a temperaturas superiores a la ambiental.

En base a estos parámetros de diseño, se realizaron diversos diagramas de Ashby que llevaron a la selección óptima de materiales. Inicialmente se seleccionaron dos aleaciones ampliamente utilizadas:

- AA 6082 - T6 debido a su facilidad de mecanizado, su resistencia a la corrosión y la experiencia previa en los talleres del CIEMAT con este material y
- AA 7075 - T6 debido a su elevado uso y buenas propiedades mecánicas frente a su densidad.

En la Figura 13, se muestran las ubicaciones de estas aleaciones en un diagrama de resistencia específica. Es importante remarcar que solo las aleaciones de Mg presentan una mayor resistencia específica, para valores de resistencia a la tracción similares, pero éstas presentan mayores costes y problemas en el proceso de mecanizado y en la resistencia a la corrosión que las de Al.

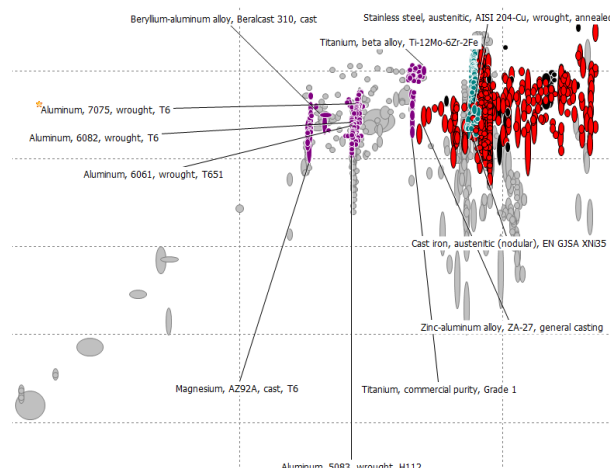


Figura 13. Aleaciones con las mejores cualidades preseleccionadas. Límites elásticos superiores a 270 MPa, baja densidad, precio, buen comportamiento a elevadas temperaturas y frente al agua.

El material base adquirido se caracterizó, comprobando que sus valores de resistencia y límite elásticos se adecuaban a la normativa. Además, se realizaron ensayos de tracción a 150 °C para evaluar la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas de las aleaciones seleccionadas.

0.6.2 Análisis estructurales de las boquillas

Para las modelaciones se utilizaron dos programas, SolidWork para el modelado individual de todas las piezas en el caso de un comportamiento anómalo de la boquilla (Figura 14 y Figura 15) y ANSYS para la simulación del conjunto de la boquilla en condiciones normales de trabajo (Figura 16 - Figura 19). Mediante estas simulaciones se identificaron las piezas más débiles del diseño y se calcularon las tensiones de Von Mises que se generaban en operación, así como el factor de seguridad de las mismas.

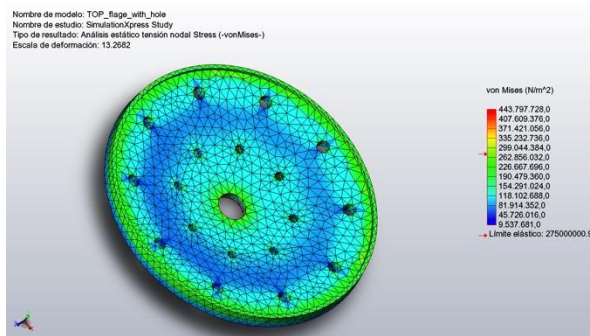


Figura 14. Análisis de tensiones de la pieza más sensible, top_flage, a escala 1:1 en AA 6061 – T6 suponiendo una presión interna de 2.5 MPa.

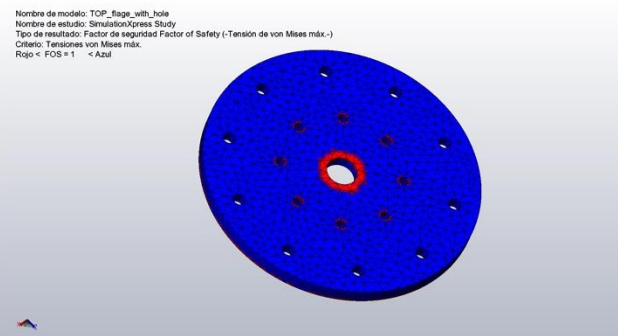


Figura 15. Zonas donde en FS es menor de 1 para las condiciones y material seleccionado. En este caso se supera el límite elástico del material.

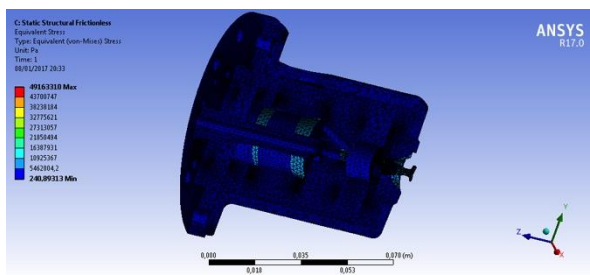


Figura 16. Tensiones generadas en la boquilla B 1:2 en funcionamiento normal a 2.5 MPa en AA 7075 – T6, suponiendo un movimiento libre de las piezas seleccionadas.

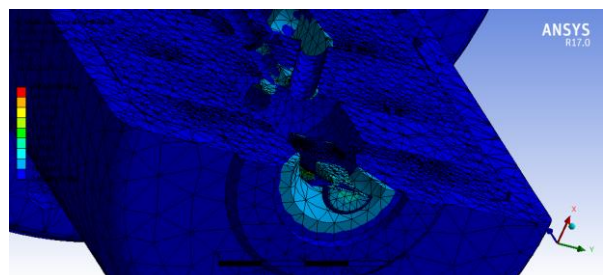


Figura 17. Detalle de la zona donde se produce una mayor acumulación de tensiones.

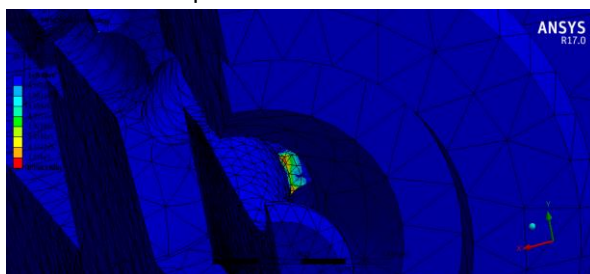


Figura 18. Detalle de la vida útil de la boquilla B 1:2 de AA 7075 – T6 sometida a una presión de 2.5 MPa libre de fricciones.

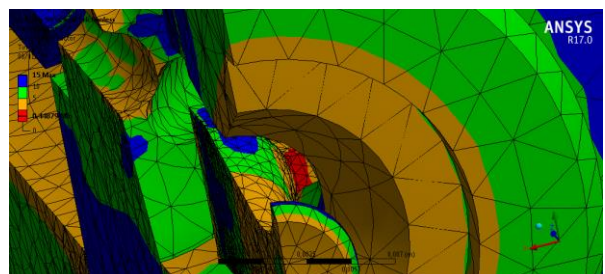


Figura 19. Detalle de la pieza de menor factor de seguridad, 0.4, al término de su vida útil (9 años).

Los resultados obtenidos de las sucesivas simulaciones confirman que la aleación de AA 7075 – T6 seleccionada garantiza la integridad del sistema de boquillas en funcionamiento. Es importante señalar que estas simulaciones son ideales, es decir, no se tiene en cuenta la abrasión que puede sufrir el material y/o la corrosión.

0.7 Ensayos de descontaminación

0.7.1 Caracterización del contaminante

Con anterioridad a la realización de los ensayos pertinentes de descontaminación, se caracterizaron los simuladores NR seleccionados. A continuación se muestran los resultados de los tamaños de partícula medidos para cada uno de ellos (Figura 20), así como su tiempo de vuelo (Figura 21).

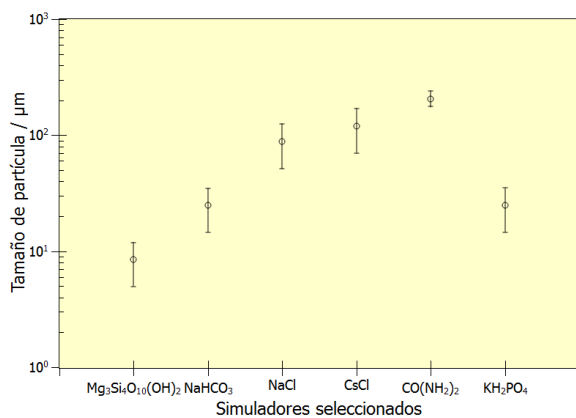


Figura 20. Variación de la distribución de tamaños con la naturaleza del material (diámetro 50 %, 10 % y 90 %).

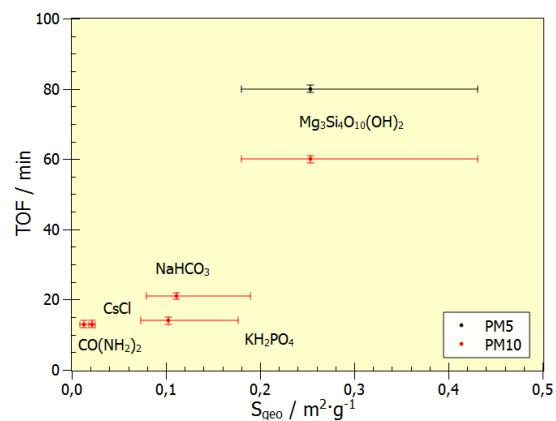


Figura 21. Representación gráfica de las relaciones entre el TOF y S_{geo} .

0.7.2 Efectividad del sistema contramedida

Para comprobar la operatividad del sistema de limpieza propuesto en el COUNTERFOG (que forma parte de esta memoria), se realizaron diversos ensayos con distintos compuestos seleccionados en función de su polaridad. Por un lado, se ensayaron compuestos hidrofílicos como NaHCO_3 , NaCl , CsCl , $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y KH_2PO_4 , y por otro lado, se probó el compuesto hidrofóbico de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{12}(\text{OH})_2$.

A modo de ejemplo representativo de compuestos hidrofílicos, a continuación se muestra la evolución de los aerosoles detectados por el contador de partículas en uno de los ensayos realizados con uno de estos compuestos (Figura 22).

En este gráfico puede observarse la suspensión inicial del contaminante, la dispersión de la niebla del sistema contramedida y cómo después de 17 – 18 min desde el inicio del experimento, la niebla se ha depositado por completo arrastrando consigo las partículas dispersas de CsCl . En la caracterización previa de la evolución temporal del aerosol de contaminante, a los 30 min aún se detectaron partículas dispersas residuales, sin embargo, en estos ensayos tras la aplicación y precipitación de la niebla, no se detectan partículas en el ambiente.

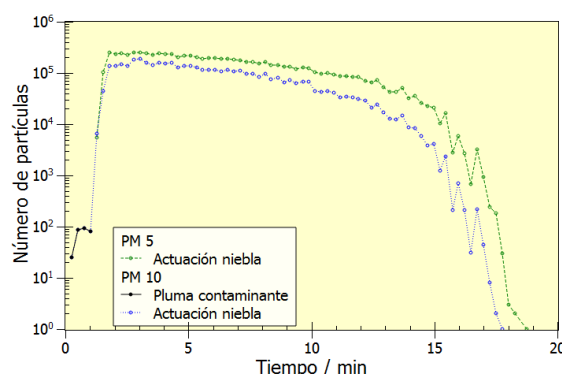


Figura 22. Evolución de la explosión de CsCl, la dispersión de niebla posterior y la deposición de la misma por efecto de la gravedad.

En cambio, al aplicar una niebla generada en las mismas condiciones y con características idénticas a la anterior, a un aerosol sólido hidrofóbico, no se consigue una limpieza efectiva de la sala tal y como se ha representado en la Figura 23. Es por ello, que se procedió al estudio del efecto de la utilización de diferentes aditivos que disminuyan la tensión superficial de la gota de agua y/o favorezcan la sorción de la misma en el contaminante. Como se observa en la Figura 24, con la adición de isopropanol al 1 % a la niebla, se consigue mejorar estos resultados y producir una limpieza optima de la sala contaminada.

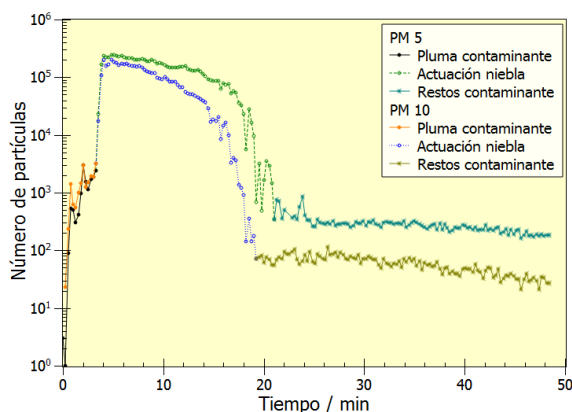


Figura 23. Limpieza ineficaz del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.

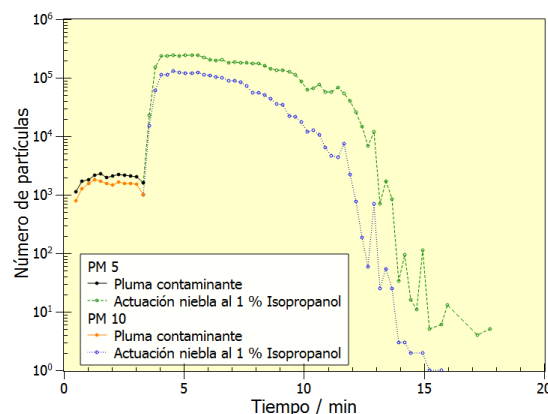


Figura 24. Limpieza del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ con una niebla al 1 % de isopropanol.

0.8 Conclusiones

En base a los ensayos realizados, se ha demostrado que el sistema de boquillas COUNTERFOG es capaz de generar nieblas que disuelven y arrastran sólidos dispersos en el ambiente tanto de carácter hidrofílico como hidrofóbico, minimizando su tiempo de permanencia en el aire y su posible dispersión.

1. Objetivos

El presente trabajo de investigación se enmarca dentro del proyecto Europeo COUNTERFOG (Device for large scale fog decontamination) financiado por el 7º programa Marco. El principal objetivo del proyecto es el diseño de un sistema de contramedida global que pueda aplicarse ante cualquier incidente que involucre agentes NRBQ (Nuclear, Radiológico, Biológico y Químico) y/o fuego.

La consecución de dicho objetivo exige el diseño del sistema de contramedida específico (es decir, el de la boquilla generadora de la niebla), su fabricación y puesta en marcha, así como la realización de los ensayos pertinentes con agentes NRBQ y/o fuego para probar su efectividad.

La presente memoria de tesis doctoral se planteó para conseguir los siguientes objetivos, algunos de ellos inicialmente incluidos y aprobados en el proyecto COUNTERFOG y otros que lo amplían:

- Análisis comparativo de los diseños propuestos del sistema de contramedida, su adaptación para su fabricación en un taller mecánico estándar y la definición de la normativa vigente a aplicar.
- Selección de los materiales para la fabricación del sistema contramedida en base a las condiciones de operación previstas (objetivo incluido en el proyecto).
- Modelación de las tensiones que se pueden generar en las piezas en su vida de operación. Esto permitirá garantizar el tiempo de vida útil de las boquillas.
- Selección y caracterización de los agentes similares de radionucleidos para los ensayos de eficiencia de la contramedida diseñada (objetivo del proyecto).
- Cuantificación de la eficiencia del sistema de contramedidas frente a un agente radiológico.

2. Introducción

El proyecto COUNTERFOG surgió con el objetivo de proporcionar un sistema de respuesta único efectivo frente a fuego y a agentes NRBQ de modo conjunto o por separado. Estos agentes pueden ser utilizados en forma de bomba sucia, por ejemplo, en una estación de tren u otro espacio público, y se pretende que el sistema sea capaz de neutralizar o al menos hacer caer y evitar así la dispersión del contaminante. Para ello, ha sido necesario adaptar sistemas actuales antiincendios no dañinos para la salud humana, sobre los cuales versa una amplia investigación, a un posible incidente en el que se encuentren presentes agentes NRBQ.

Esquemáticamente el propósito del sistema COUNTERFOG se muestra en el diagrama de la Figura 25, pretende dar respuesta a incendios y a accidentes en los que estén involucrados agentes NRBQ, así como actos terroristas.

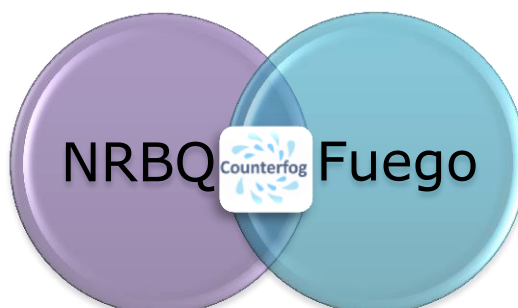


Figura 25. Versatilidad esperada del sistema de contramedida COUNTERFOG.

Para lograr alcanzar los objetivos marcados en el proyecto COUNTERFOG, y en parte en el presente trabajo de investigación, ha sido necesario diseñar, fabricar y ensayar un sistema de respuesta rápido que sea capaz de colapsar cualquier tipo de agente disperso (humo, niebla, aerosol, suspensión, etc.) mediante el uso de una niebla de agua, que puede contener aditivos que favorezcan la neutralización de los agentes dispersos. Este tipo de sistemas se pretenden implementar en áreas públicas como pueden ser estaciones de metro, tren, etc., así como en infraestructuras críticas como hospitales, aeropuertos, congresos, etc.

En los puntos de la introducción que siguen a continuación, se pretende dar una visión general de los agentes NRBQ susceptibles de utilizarse en un ataque de índole terrorista, así como del fuego y los diferentes sistemas de contramedida actuales.

2.1 Agentes NRBQ

2.1.1 Estado del arte del uso bélico de agentes NRBQ

El uso de agentes NRBQ como amenaza o también como arma, no es un hecho de reciente aparición, sino que ha ido evolucionando con el ser humano. A continuación, se realiza una revisión del estado del arte del uso de este tipo de agentes NRBQ en la historia de la humanidad hasta hoy en día.

2.1.1.1 Utilización en enfrentamientos bélicos

➤ Antigüedad.

En la comunidad científica no existe un consenso claro en relación con la fecha de inicio de utilización de este tipo de agentes, es decir, de cuándo y cómo el hombre por primera vez utilizó este tipo de amenazas contra un semejante. Algunos consideran el inicio del uso de este tipo de armas cuando el primer homínido: el Homo Habilis (hace 2.5 – 1.44 millones de años), el Homo Erectus (hace 1.8 millones de años – 130 000 años) o bien el Homo Sapiens (desde hace 150 000 años) emponzoña una de sus lanzas, flechas o cualquier utensilio con venenos de animales (serpientes, escorpiones, tarántulas, etc.) o vegetales (curare, cicuta, adelfa, tejo,...) para conseguir una muerte más rápida.

Pero si la datación se fundamenta en la evidencia basada en registros históricos distintos de la Ilíada, Biblia o el Majabhárata, existen pruebas documentales del empleo de este tipo de armas ya en la antigüedad. Existe la evidencia documental histórica de que ya en el año 600 a.C., los atenienses envenenaban los pozos de los espartanos, quienes trataron de introducir humos tóxicos a base de sulfuros en la ciudad de Atenas [1] o de que atenienses en el año 590 a.C. durante el asalto de Cirra envenenaron con Helleborus¹ el suministro de agua de la ciudad.

Otro suceso posterior registrado de la utilización con fines de bélicos de este tipo de amenazas, fue hace unos 2000 años, cuando los persas utilizaron "armas químicas" contra soldados romanos, al gasearlos con el humo generado de la incineración de cristales de azufre y betún [2]. Este tipo de técnicas se han utilizado de manera recurrente en conflictos bélicos a lo largo de la historia, sobre todo en situaciones de asedio a ciudades fortificadas.

Sin embargo, existe un elevado consenso en la comunidad científica en considerar que la evolución drástica de este tipo de armas se produjo entre finales del siglo XIX y siglo XX, como se puede constatar en los ejemplos que a continuación se enumeran.

¹Nombre genérico que deriva del nombre griego para Helleborus orientalis: "helleborus"; de "helle" para "dañar" y "bora" para "comida", donde se refiere a que daña la comida por ser planta venenosa.

➤ I Guerra Mundial.

En 1915, Alemania atacó tropas aliadas a las afueras de Ypres con Cl_2 [3]. Esta fue primera vez que se empleó un gas letal en guerras modernas. Ypres marcó un antes y un después en la "guerra química". A partir de este momento, y durante la I Guerra Mundial, ambos bandos en la guerra de trincheras emplearon todo tipo de armas químicas (Cl_2 , fosgeno " COCl_2 " y gas mostaza (HD) " $\text{C}_4\text{H}_8\text{Cl}_2\text{S}$ " en su mayoría). Por este hecho, son muchos los historiadores que denominan a ésta como la "Guerra Química", donde sin contar la población civil más de noventa mil soldados murieron y más de un millón resultaron heridos a consecuencia de este tipo de gases experimentando una muerte agónica durante días o incluso semanas [4].

Durante estos años, no solo fueron evolucionando los tipos de agentes utilizados, sino también los sistemas vectores, desde los simples botes de Cl_2 que eran abiertos en las trincheras, a sistemas más complejos como bombas de artillería cargadas con todo tipo de agentes químicos, para así evitar que por un cambio en la dirección del viento muriesen asfixiadas las propias tropas que utilizaban estos artefactos [5].

Esta terrible situación propició que en 1925 se desarrollara el borrador, y posterior firma por parte de los países adheridos, del protocolo de Ginebra [6]. Mediante este protocolo se prohíbe el uso de armas químicas y biológicas pero no especifica nada acerca de la producción, almacén o transferencia de las mismas.

Aun habiéndose iniciado un control del uso de este tipo de armamento con el protocolo de Ginebra, en el mismo año de su creación 1925, Francia y España utilizaron gas mostaza en la guerra del Riff (Marruecos) [7]. Entre 1935 - 1936, Italia utilizó gas mostaza en Etiopía para intentar conservar su colonia ocasionando más de 15 000 muertes [5]. Incluso después de la ratificación en 1929 el protocolo de Ginebra por parte de España, existen evidencias del empleo de estas armas durante la Guerra Civil española (1936 - 1939), por ejemplo en 1937, existen indicios de la utilización de armas químicas en Cilleruelo de Bricia (Burgos) [8].

➤ II Guerra mundial.

En el período entre la I y la II Guerra Mundial, los estados involucrados desarrollaron novedosas armas químicas. Grupos de investigación alemanes desarrollaron nuevos agentes nerviosos (en terminología sajona G - Agents) como el tabún " $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_2\text{O}_2\text{P}$ ", sarín " $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{FO}_2\text{P}$ " y somán " $\text{C}_7\text{H}_{16}\text{FO}_2\text{P}$ ", que fueron ampliamente ensayados y utilizados por el III Reich y empleados por las Schutzstaffel en las cámaras de gas de los campos de concentración hasta el final de la II Guerra Mundial.

Durante el mismo período (1938 - 1945), Japón (Escuadrón 731 del Ejército Imperial) en la guerra en Asia utilizó este tipo de agentes, por ejemplo, atacó a China en varias ocasiones con diferentes agentes químicos, afectando tanto al ejército como a la población civil. Para ello, empleó desde gas mostaza a otros agentes químicos como fosgeno y ácido cianhídrico [5]. Entre 1940 - 1942, Japón infectó a prisioneros con sífilis, gonorrea, etc., y atacó distintas ciudades chinas con agentes como cólera, peste bubónica y tularemia, entre otros agentes [9].

La existencia del protocolo de Ginebra propició que, en la II Guerra Mundial (1941 – 1945), éste tipo de armas no se utilizaran masivamente en el campo de batalla. Pero como se ha comentado con anterioridad, los gases letales desarrollados por ambos bandos sí fueron ensayados, por ejemplo, en los exterminios raciales en las cámaras de gas alemanas o en Manchuria. Como colofón a este desarrollo armamentístico, en 1945, se produjo el ataque sobre la población civil de Hiroshima y Nagasaki con el fin de demostrar el efecto devastador de las armas nucleares, lo que produjo, según las últimas estimaciones, un número inicial de bajas en Hiroshima de alrededor de 135 000 mientras que el de Nagasaki fue de 64 000 [10]. Estudios posteriores realizados a partir del seguimiento de la población, han demostrado que sólo en Hiroshima el número de bajas asociadas a la bomba es de 286 818, incluidas las fallecidas por cánceres, leucemias y malformaciones genéticas.

➤ Guerra Fría.

Este período abarca desde el final de la II Guerra Mundial hasta aproximadamente la caída del muro de Berlín en 1989. En él se constató un desarrollo significativo, fabricación y almacén de armas químicas y biológicas [11]. Entre 1940 - 1960, se desarrollaron todo tipo de agentes diferentes a los empleados hasta ese momento, como por ejemplo los agentes VX [5]. Dicho desarrollo estaba políticamente justificado en el hecho de que el protocolo de Ginebra no impedía la investigación, fabricación y almacén de este tipo de agentes, así como tampoco su uso contra países no firmantes del acuerdo.

Por ejemplo, EEUU, entre 1955 - 1975, realizó diferentes experimentos con agentes químicos y biológicos con militares estadounidenses enmarcados dentro del "Proyecto 112" [12].

En guerras existentes en este período se continuó utilizando armamento NRBQ. Entre ellas cabe destacar, por el número de población civil afectada, la Guerra de Vietnam (1959 – 1975) [3], donde se empleó agente naranja y otros herbicidas [13], así como bombas incendiarias de napalm [14]. Hoy en día, aún persisten las secuelas de estos ataques [15].

En la década entre 1970 – 1980, se estima que al menos unos 25 países desarrollaban capacidades relacionadas con las armas químicas. Por lo que se puede estimar que, desde la I Guerra Mundial, las armas NRBQ han causado más de un millón de muertes [11]. Por ello y tras los numerosos conflictos bélicos, donde no solo morían soldados sino también la población civil, las superpotencias mundiales, de EEUU y la URSS, terminaron por anexionarse al protocolo de Ginebra y promovieron otros tratados que completaron este primer protocolo [11].

➤ Guerra Irán – Iraq.

A continuación, la inestabilidad se trasladaría fundamentalmente a Oriente Próximo, donde aconteció la guerra entre Irán e Iraq (1980 – 1988). En ella numerosos soldados iraníes fueron víctimas de los ataques con gas mostaza por las fuerzas iraquíes de Saddam Hussein [16]. Fuentes oficiales estiman que en torno a 20 000

soldados murieron y un gran número de los supervivientes de estos ataques (5000) continúan recibiendo tratamiento médico y otros (≈ 1000) permanecen hospitalizados con enfermedades crónicas severas generadas a causa de la exposición a estos tipos de agentes [16].

Antes de que terminara la guerra, en 1988 fuerzas militares iraquíes realizaron un ataque aéreo masivo con un cóctel de agentes químicos (gas mostaza, tabún, VX, napalm y fósforo blanco) sobre su propio pueblo en Halabja (Iraq) causando más de 5000 bajas entre la población kurda [5].

➤ Guerra de las Malvinas.

En 1982, fuerzas argentinas utilizaron gases lacrimógenos durante la invasión de las Islas Malvinas, lo que enmarca esta guerra dentro de la guerra química. Como positivo, destacar que el empleo de estos gases no supuso ninguna baja en las filas británicas. Pero también las tropas británicas utilizaron agentes químicos como las granadas de fósforo blanco [16, 17]. Algunos países defienden el uso de este compuesto como un agente de estrategia militar, lo que permite estar amparado legalmente, al no estar incluido este gas en la convención sobre armas químicas [18].

➤ Guerra de Angola.

En 1988, la ONU (Organización Naciones Unidas o United Nations "UN" en terminología sajona) acusó erróneamente a Cuba de la utilización de armas químicas en la guerra de Angola. Posteriormente, se verificó que la inteligencia militar africana llevaba tiempo tratando de impulsar el uso de este tipo de armamento y eran los responsables de los ataques químicos en territorio angoleño [16].

En el siglo XXI, la mayor parte de los ataques realizados con estas armas están relacionados con actuaciones de grupos armados terroristas, por ejemplo, los asociados con el terrorismo yihadista o en situaciones de guerras civiles en Oriente Próximo:

➤ Guerra civil en Siria.

En 2013, murieron en Alepo 26 personas y más de 86 resultaron heridas en un bombardeo con misiles y armas químicas (Cl_2 y HCl (g)). Seguidamente, tuvo lugar el ataque químico de Guta, en Damasco. Murieron cerca de 1400 personas y dejó heridas a más de 3000 personas [19-22].

Recientemente, Josh Jaques, portavoz del Mando Central de EEUU (CENTCOM) ha reconocido el empleo de uranio empobrecido en Siria en 2015 [23].

➤ Guerra civil en Yemen.

Actualmente, se siguen detectando ataques aislados en países de Oriente Próximo, como Yemen, donde estalló una guerra civil en 2015. En este caso, se tienen sospechas de que fuerzas del ISIS están utilizando fósforo blanco en el noroeste de Yemen [24]. Hoy en día, muchos países siguen defendiendo la utilización de fosforo blanco como

estrategia militar, para generar distracciones y cortinas de humo que oculten a las tropas, aunque otros ya lo consideran un arma química en cualquiera de sus usos.

No obstante, no era la primera vez que se utilizaban este tipo de armas en Yemen, ya que durante la guerra civil del norte de Yemen, durante los años 60, existen indicios fehacientes de la utilización de gases halogenados como fosgeno, gas mostaza, lewisita, Cl_2 o BrCN [16, 17].

2.1.1.2 Ataques terroristas aislados

Como se ha comentado con anterioridad, en los últimos 40 años, se han detectado ataques aislados que generan un número reducido de bajas pero, su impacto en los medios de comunicación y por ende en la sociedad es muy elevado. Algunos de los ataques más relevantes producidos son los siguientes: en 1984 el ataque con salmonella en un restaurante de EEUU [25], en 1994 y 1995 ataques de la secta religiosa Aum Shinrikyo en Matsumoto (Japón) y en el metro de Tokio con gas sarín [4] y en 2001 las cartas de ántrax recibidas en EEUU [4].

En EEUU se ha utilizado este último tipo de método de ataque, envío de cartas o paquetes impregnados con ricina (agente biológico) en 2003 y 2013, recibándose cartas en la Casa Blanca en las que se detectó la presencia de dicha sustancia. Así mismo, en 2003, se tiene constancia de la detención de grupos terroristas asociados con la fabricación, manipulación o el envío de ántrax (en Londres y en París de grupos terrorista yihadistas y chechenos, respectivamente [4]).

2.1.1.3 Accidentes industriales con agentes NRBQ involucrados

Por otro lado, además de conflictos bélicos y ataques de índole terrorista, existe también el riesgo asociado con la fabricación, almacén y transporte de este tipo de materiales para otro tipo de fines, hecho que puede provocar la aparición accidentes fortuitos durante alguno de los procesos. Entre los más conocidos destacan los siguientes: un escape de gas mostaza en Italia que mató a 43 personas en 1943 [25], un incidente con ántrax en la URSS en 1979 que se cobró la vida de 68 civiles [25, 26] y el más terrible el de India de 1984 con isocianato de metilo (pesticida), donde murieron varios miles de personas y más de 500 000 personas resultaron afectadas [27-29].

A este tipo de accidentes de proceso, se le suma la problemática de las fuentes huérfanas² [30]. El laxo control de este tipo de fuentes ha generado varios incidentes de carácter radiológico en la historia. Entre ellos, destacan el de Brasil de 1987 [31], en

²El RD (Real Decreto) 229/2006 [30] *Real Decreto 229/2006, de 24 de febrero, sobre el control de fuentes radiactivas encapsuladas de alta actividad y fuentes huérfanas.*, RD 229/2006, 2006. define una fuente huérfana como “una fuente encapsulada cuyo nivel de actividad en el momento de ser descubierta es superior al valor de exención establecido en las tablas A y B del anexo I del Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas y en la Instrucción IS/05 del Consejo de Seguridad Nuclear, y que no esté sometida a control regulador, sea porque nunca lo ha estado, sea porque ha sido abandonada, perdida, extraviada, robada o transferida a un nuevo poseedor sin la debida notificación a la autoridad competente, o sin que haya sido informado el receptor”.

el cuál una fuente encapsulada de teleterapia de ^{137}Cs de un hospital abandonado, fue extraída y su carcasa vendida como chatarra. El Cs fue repartido por la ciudad debido a su llamativo aspecto brillante. Numerosas casas y personas fueron monitoreadas y se registraron 4 muertes. Otro de los problemas principales fue que lluvias extensas dispersaron el CsCl ampliando la extensión de superficie afectada [32].

En España, se han detectado varios accidentes debido a este tipo de fuentes huérfanas. Entre los más recientes se encuentran el accidente de Acerinox, en 1998, con una fuente de ^{137}Cs [33, 34]. Cápsulas protectoras que había albergado una fuente de ^{137}Cs llegó a una acería, con la consecuente fundición de la misma y emisión al exterior de partículas radiactivas contaminantes. Esto no fue un hecho aislado, en 2003 otra siderurgia vasca (ACB) tuvo también problemas al detectarse en un camión de cenizas a la salida restos de ^{137}Cs [35], y posteriormente en 2007, en la acería Sidenor detectaron también una fuente de ^{137}Cs de baja actividad entre sus materiales [36].

A modo de resumen en el siguiente gráfico se muestra el uso de agentes NRBQ como arma y de los accidentes que han sucedido en los 2 últimos siglos (Figura 26).

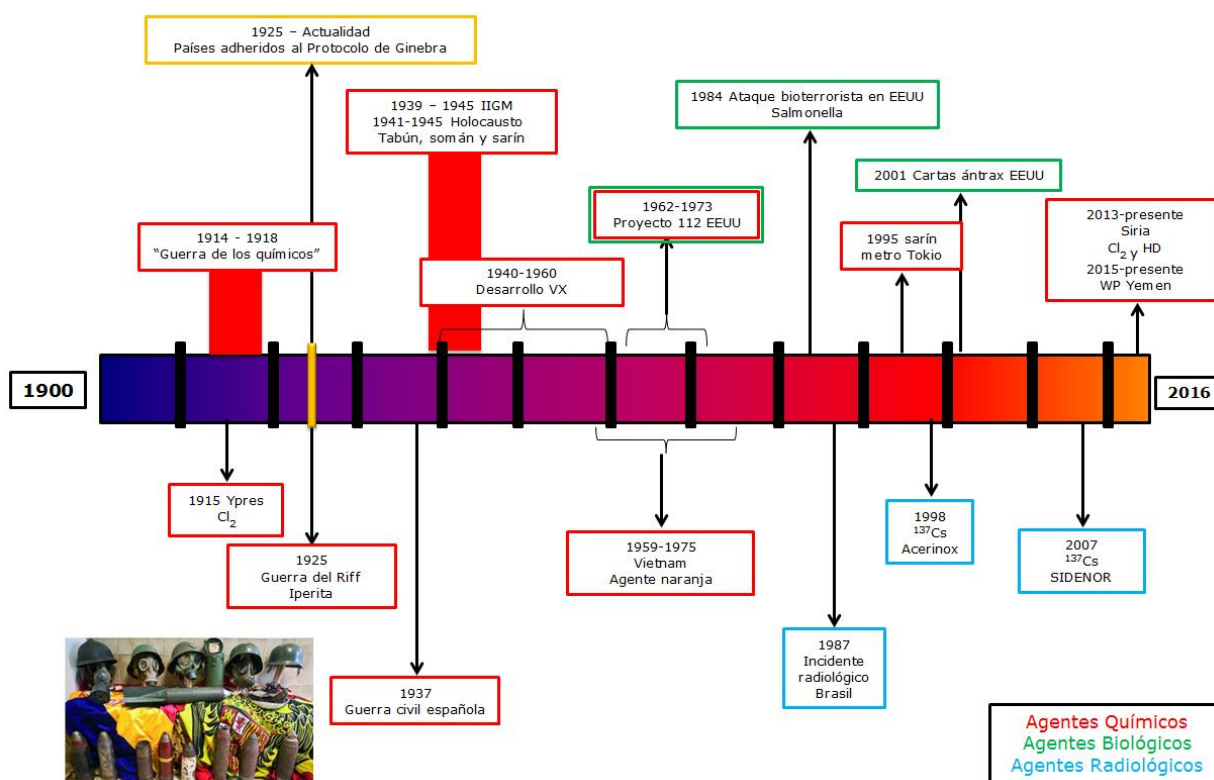


Figura 26. Esquema de los ataques y accidentes más destacados en los que están involucrados algún tipo de agente NRBQ.

2.1.2 ¿Es realista considerar la amenaza NRBQ?

Para poder responder a esta pregunta hay que contemplar las distintas facetas que tienen este tipo de armas: primero, su desarrollo está motivado por el impacto psicológico que genera en el ser humano la utilización de este tipo de armamento, así como su eficiencia [14]; segundo, en el mundo globalizado actual existe una transferencia de conocimiento, comunicación y tecnología elevada, lo cual aumenta el riesgo y los temores a que grupos criminales puedan organizar una red y tener acceso a los conocimientos y tecnologías necesarias para producir un arma empleando este tipo de agentes NRBQ; y tercero, el desarrollo tecnológico que vivimos hoy en día, se traduce en un uso cotidiano de materiales radiactivos y nucleares tanto en energía, como en investigación o medicina y esto requiere de procesos de fabricación, almacén y transporte, lo que hace posible que debido a un fallo en la seguridad en alguno de los procesos, estos materiales acaben en las manos equivocadas [10].

➤ Terrorismo nuclear y radiológico.

Las armas nucleares y radiológicas, así como las biológicas, son las que representan un mayor peligro, sin olvidar el posible empleo de agentes químicos. En concreto, las armas nucleares son las más peligrosas de la tierra. Son capaces de reducir una ciudad entera a cenizas y matar a millones de personas. Además, no solo tienen repercusión en el momento de empleo, sino que tienen unas consecuencias devastadoras a largo plazo. Como se ha expuesto anteriormente, solo existen registros de la utilización de armas nucleares en dos ocasiones Hiroshima y Nagasaki en 1945.

Pero es importante recordar que, según la base a datos de la ONU [11], en la actualidad aún quedan 26 000 bombas de este tipo en el mundo y se han realizado más de 2000 ensayos nucleares. Motivo que impulsa a algunos países, dentro del marco de la ONU, a promover el desarme nuclear de todos los países sin excepción.

Los requisitos tecnológicos y los controles nacionales e internacionales (OIEA, Organismo Internacional de Energía Atómica) hacen que el riesgo asociado a la utilización de materiales nucleares sea muy bajo. Pero, dada la amplia utilización de fuentes radiactivas para distintos usos en nuestra sociedad junto con la menor exigencia tecnológica necesaria, hace que materiales radiológicos sean más atractivos para su utilización en un ataque terrorista.

En concreto, las armas radiológicas son muy seductoras por su elevado impacto mediático, y por su facilidad de transporte y ocultación, a lo que se le suma el impacto psicológico que generan al ser armas que son organolépticamente imperceptibles [4]. Además, los costes económicos asociados a la limpieza de un terreno contaminado por isótopos radiactivos es muy elevado. La forma de utilizar fuentes radiactivas enmarcadas dentro de un acto terrorista sería mediante la fabricación de un RDD (Radiological Dispersion Device). Existen tres tipos posibles de RDD [4, 37]:

- RDD atmosférico. Se ayuda de corrientes de aire para dispersar el material radiactivo.

- RDD pasivo. Consiste en colocar material radiactivo en un lugar oculto y que personas que estén alrededor se irradien sin saberlo. También es conocido como RED (Radiological Exposition Device) [37].
- RDD explosivo o también conocido como bomba sucia. Este sería el método más utilizado debido a su eficacia. Consiste en detonar un explosivo convencional en presencia de material radiactivo.

También, se podría dar el caso de un intento de administración directa o inyección de material nuclear u otros materiales radiactivos. Otros ejemplos de posible dispersión de material NR (Nuclear y Radiológico) es en paquetes y correspondencia, mediante dispositivos de pulverización comerciales o improvisados, a través de aviones fumigadores, extintores, sistemas de aire acondicionado, generadores de humo o ventiladores de refrigeración o nebulizadores entre otros [37].

Por último, y como indicador de la existencia de un riesgo real asociado con este tipo de amenaza, indicar que en la base de datos del OIEA – ITDB [38] desde el 31 de diciembre de 2015 se han declarado por los países miembros 2899 incidentes de materiales fuera de control del regulador (MORC) y en la base de datos de INTERPOL (Organización Internacional de Policía Criminal) están registrados desde el 2002, 3350 incidentes con materiales nucleares o radiactivos [39].

➤ Terrorismo químico [40].

Existen numerosos agentes químicos clásicos utilizados en multitud de conflictos bélicos. Estos Agentes Químicos de Guerra (CWA, Chemical Warfare Agents en terminología sajona) fueron diseñados para matar, por lo que su toxicidad es muy elevada. Sintetizar un agente de este tipo no es un proceso trivial y existen multitud de reglamentaciones que harían saltar las alarmas internacionales si un individuo intentara fabricar un agente de este tipo. Los arsenales químicos de este tipo están supervisados y en vías de una destrucción controlada debido a la aplicación de diversos tratados como el de la convención sobre armas químicas [18].

Debido a esto, lo más sencillo para un ataque de este tipo es la utilización de productos químicos industriales, también denominados TIC en terminología sajona (Toxic Industrial Chemicals) [41]. Este tipo de productos no son tan tóxicos, pero son de fácil adquisición. Un ejemplo de esto, son los ataques con Cl_2 perpetrados por grupos terroristas en la actualidad en Oriente Próximo.

➤ Terrorismo Biológico [42].

Los agentes biológicos presentan una amplia versatilidad, tanto en el posible número de bajas, como en los métodos de diseminación. Estos pueden ir desde una carta con ricino o ántrax que afecta a un número reducido de personas, hasta la contaminación de agua o atmósferas que afecta a un número elevado de personas. Por lo general, los agentes biológicos que suelen utilizarse son bacterias o toxinas, dejando a un lado la posible utilización de parásitos o virus.

2.1.2.1 Iniciativas internacionales

De todo lo anteriormente expuesto, se demuestra la existencia de una amenaza real y la sensibilización de la opinión pública internacional en relación con este tema, como consecuencia se han desarrollado distintas iniciativas que intentan mediante la cooperación internacional responder y reducir la amenaza para la sociedad. Es importante resaltar que desde la convención de Ginebra de 1925 [6], se han ido desarrollando nuevos aspectos en función de las necesidades de control asociadas con las utilidades que se fueron observando, que se han formalizado en tratados y resoluciones suscritos dentro del marco de las Naciones Unidas y de su consejo de seguridad, como son:

- Tratado sobre la no proliferación de armas nucleares de 1968 [43].
- Convención sobre armas biológicas en 1972 [44].
- Convención sobre armas químicas en 1992 [18].
- Resolución 1540 [45] de 2004 del CSNU (Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas) sobre la no proliferación de armas nucleares, químicas y biológicas así como sus sistemas vectores.

Todo este tipo de acuerdos, no son de aplicación inmediata si no que necesitan una ratificación por cada uno de los países. Por ejemplo, no todos los países se adhirieron al Protocolo de Ginebra de manera inmediata, EEUU no lo firmó hasta 1975 [1].

Algunas de estas iniciativas se van a desarrollar en los apartados siguientes.

2.1.2.1.1 OIEA

En 1957, se creó el OIEA, con el fin de tratar de acelerar y aumentar la contribución de la energía nuclear para fines de paz, salud y prosperidad. Su principal objetivo es favorecer la cooperación internacional y el intercambio de información científica y técnica sobre la energía nuclear.

El OIEA establece diferentes normativas de seguridad y protección ambiental y controles para asegurar que la asistencia prestada no es utilizada con fines militares. Además, el OIEA, también desarrolla normas básicas de seguridad para la protección contra radiaciones ionizantes y elabora reglamentos y códigos para determinadas actividades y seguridad en el transporte de materiales radiactivos. El OIEA trata de inculcar en todos los países participantes una fuerte cultura de la seguridad en todas las actividades relacionadas con la industria nuclear y radiactiva [46].

2.1.2.1.2 CSNU 1540

El CSNU aprobó en 2004 la resolución 1540 [45]. En ella se afirma que la proliferación de las armas nucleares, químicas y biológicas, así como sus sistemas vectores, constituyen una amenaza de paz y seguridad internacional. La resolución obliga a los estados a abstenerse de suministrar cualquier tipo de apoyo a los agentes

no estatales que traten de desarrollar, adquirir, fabricar, poseer, transportar, transferir o emplear armas nucleares, químicas o biológicas y sus sistemas vectores.

2.1.2.1.3 GICNT

La Iniciativa Mundial para Combatir el Terrorismo Nuclear (GICNT, Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism en terminología sajona) es una asociación internacional cuyo principal objetivo es fortalecer la capacidad mundial para prevenir, detectar y responder al terrorismo nuclear. En ella se elaboran planes, políticas y procedimientos, y se favorece la interoperabilidad entre los países socios. Esta iniciativa pretende desarrollar la capacidad de asociación para combatir el terrorismo nuclear, en consonancia con las autoridades y obligaciones jurídicas nacionales, así como con los marcos jurídicos internacionales pertinentes, como pueden ser las distintas resoluciones del CSNU [47].

2.1.3 Agentes NRBQ. Efectos y selección de simuladores

En este punto se van a exponer los compuestos NRBQ de uso más extendido y sus posibilidades de utilización en un acto terrorista y sus efectos. Asimismo, se expondrá un listado de simuladores que propone la bibliografía y que podrían utilizarse en el COUNTERFOG-Lab (Laboratorio COUNTERFOG) para la realización de las pruebas pertinentes.

2.1.3.1 Agentes nucleares y radiológicos

En la actualidad el uso de fuentes y dispositivos radiológicos es muy diverso y ampliamente extendido (ver Figura 27). Los campos en los que es habitual la utilización de este tipo de fuentes van desde el uso médico, esterilización de equipos (irradiación de productos con fines no médicos), sistemas de calibración, sistemas de formación de imágenes (radiografías), análisis y caracterización de materiales, etc. [48].

El OIEA propone la clasificación (o categorización) de los materiales radiactivos en función de la actividad del radionucleido y del riesgo asociado a su utilización y transporte. En la Figura 28, se muestran las fuentes radiactivas más utilizadas industrialmente en función de las 5 categorías establecidas por la normativa del OIEA [48, 49]. En esta clasificación la categoría 1 es la más peligrosa (a la izquierda de la imagen, y la conforman irradiadores y aparatos de teleterapia) y la categoría 5 que es la menos peligrosa (derecha de la imagen tales como analizador de fluorescencia de RX, pararrayos, detectores de humo antiguos y señales autoluminiscentes) [37].

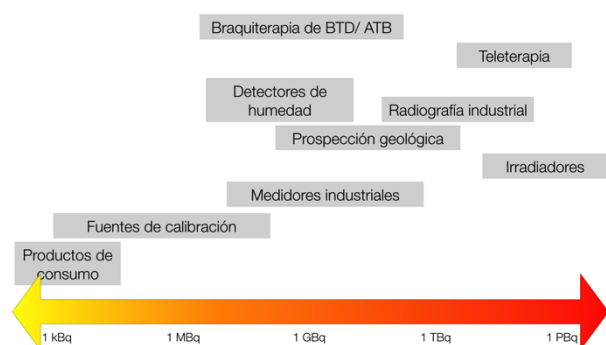


Figura 27. Actividad de distintas fuentes radiactivas [50].

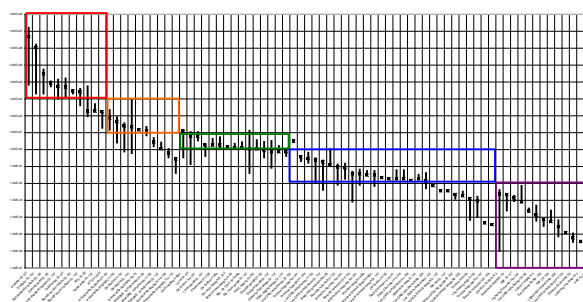


Figura 28. Actividades de radionúclidos empleados industrialmente [51].

Los radioisótopos que presentan un mayor riesgo para la utilización en un dispositivo RDD, son fuentes radiactivas de índole comercial como son el ^{226}Ra , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{131}I y ^{137}Cs . A continuación se muestran algunas propiedades de los mismos (ver Tabla I).

Tabla I. Propiedades generales de los radioisótopos susceptibles de utilización como RDD [52].

NR	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$P_f / ^\circ\text{C}$	Emisor
^{226}Ra	5.5	700	α
^{60}Co	8.9	1495	β^-
^{90}Sr	2.6	777	β^-
^{238}Pu	19.8	639	α
^{241}Am	13.67	1176	α
^{137}Cs	1.9	28	β^-
^{131}I	4.93	114	β^-
$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$	19.05	1132	α

2.1.3.1.1 Efectos de la exposición a fuentes radiactivas

Ya sea en un acto delictivo premeditado o no, si se está en presencia de un material radiactivo (encapsulado o no) y con un blindaje insuficiente o defectuoso, estaremos expuestos a radiaciones ionizantes. Esta radiación deposita una parte de su energía en nuestro organismo mediante la ionización o excitación de los átomos. Esta ionización de los átomos del tejido causa efectos biológicos nocivos, pudiendo alterar el ADN (ácido desoxirribonucleico) [48].

Los efectos producidos por la radiación ionizante en la salud se clasifican en dos tipos: efectos deterministas y efectos estocásticos. Los efectos deterministas, que ocurren cuando la dosis o la tasa de dosis es superior a un valor umbral, no tardan en manifestarse y son más dañinos cuanto más elevada es la dosis. Un ejemplo de ellos son el síndrome agudo de la radiación, las quemaduras en la piel y la esterilidad. Por otro lado, los efectos estocásticos se producen si la dosis es baja o si se está expuesto a ella durante un periodo de tiempo prolongado. En este tipo de exposición existe la posibilidad de que las células del cuerpo se reparen por sí solas. Aun así, pueden producirse efectos nocivos en los cuales la célula se transforma. El cáncer es el

principal efecto de este tipo de exposición. Además, las modificaciones que puedan producirse en las células son hereditarias [48].

En el caso de una fuente no encapsulada o de la pérdida del blindaje de una fuente encapsulada, por ejemplo en una explosión, estaremos expuestos a radiaciones ionizantes, pero, además, existirá la posibilidad de contaminación por deposición o inhalación de las partículas de estos materiales radiactivos (posible riesgo químico). En general, se suele hablar de contaminación con partículas α y β y de irradiación γ o neutrónica.

2.1.3.1.2 Simuladores NR seleccionados

Dada la elevada aplicación industrial de estos materiales la cantidad de radioisótopos disponibles es muy numerosa tal y como se muestra en la Figura 29. Debido a ello, para que la selección de simuladores fuese lo más representativa posible, se propusieron los siguientes criterios para la búsqueda de los simuladores óptimos:

- Nivel de uso en aplicaciones industriales, técnicas o médicas de las fuentes radiactivas (Figura 29).
- Fácil acceso en la UE (Unión Europea).
- Similitudes físicas y químicas.
- Facilidad de dispersión.
- Posibilidad de utilización en condiciones de seguridad dentro del laboratorio diseñado y con los medios disponibles.

En base a estos criterios, se centró el estudio de selección en los isótopos mostrados en la Figura 30. En esta zona, se observan isótopos de I y Cs, utilizados ampliamente en numerosas aplicaciones, tal y como se ha comentado al inicio de este punto del presente trabajo de investigación (ver punto 2.1.3.1).

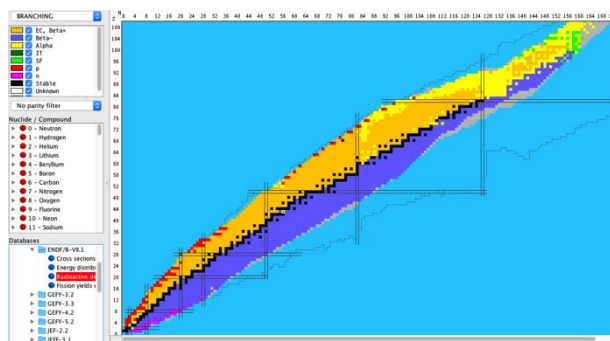


Figura 29. Tabla de isótopos (Z vs N [52]).

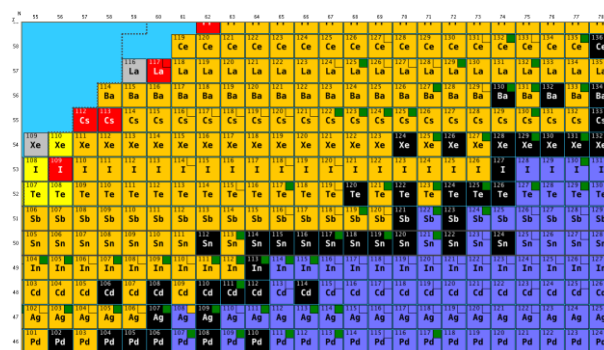


Figura 30. Detalle de isótopos (Figura 29) en la zona de interés del I y Cs [52].

En base a estos gráficos, se propuso la utilización de I_2 , así como yoduros en el COUNTERFOG-Lab. El I_2 se seleccionó como candidato debido a que su isótopo artificial ^{131}I con un periodo de semidesintegración de 8 días es radiactivo (emisor β). Es un producto de la fisión nuclear y se utiliza en radioterapia. También se puede obtener ^{129}I a través del decaimiento del ^{238}U , a su vez radiactivo. Por otro lado, se eligió el KI, para

evaluar la posible formación de halógenos de yodo, y para seleccionar un compuesto de yodo que nos asegure su permanencia en estado sólido y que no se sublima al dispersarlo. El KI en presencia de Cl_2 forma KCl y I_2 . Con ambos productos hay que tomar precauciones de seguridad y estudiar los posibles efectos de la corrosión en el laboratorio.

Por otro lado, se eligió CsCl inactivo ya que es un producto que comúnmente se formaría en una explosión nuclear, o bien, en un incidente de carácter radiológico [53, 54], como el acontecido en Brasil [31], por efecto de la lluvia. Los isótopos radiactivos de CsCl son utilizados a su vez en medicina nuclear, incluso para el tratamiento del cáncer. Para tratamientos médicos se requieren isótopos radiactivos de alta densidad, restringiéndose el uso de un compuesto no soluble de Cs. Sin embargo, el CsCl posee una elevada solubilidad, siendo a su vez elevadamente higroscópico, lo que es posible que dificulte la suspensión del mismo en determinadas condiciones ambientales en el laboratorio. Además, posee la misma estructura que el CsI, producto que también puede producirse en un reactor nuclear.

Por último, se eligió la urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) y el KH_2PO_4 porque son sales de diferente solubilidad. En caso de dispersión será más habitual encontrar óxidos y sales de los radionucléidos, que los isótopos en estado metálico presentados en la Tabla I. A continuación, se muestran algunos de los parámetros físico - químicos más relevantes de estos compuestos para la aplicación, pudiendo influir en su interacción con las gotas de agua (ver Tabla II).

Tabla II. Propiedades de los simuladores NR preseleccionados proporcionados por el proveedor Sigma – Aldrich en su ficha de seguridad.

NR	$M_w / \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$P_f / ^\circ\text{C}$	S / $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$
I_2	253.81	4.93	113	0.3 a 25 $^\circ\text{C}$ – Ligeramente soluble
KI	166	3.13	681	1280 a 6 $^\circ\text{C}$
CsCl	168.36	3.99	645	1000 a 20 $^\circ\text{C}$ - Soluble
KH_2PO_4	136.09	2.34	253	208 a 20 $^\circ\text{C}$
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	60.06	1.34	132	480 a 20 $^\circ\text{C}$ - Totalmente soluble

2.1.3.2 Agentes químicos

Los agentes químicos o CWA que se suelen emplear como arma, son tanto los compuestos químicos industriales convencionales de fácil acceso y menor toxicidad, como agentes de diseño clásicos de guerra. El espectro de posibles agentes químicos industriales a utilizar es muy elevado, por lo que el estudio se centró en los agentes de guerra clásicos y se buscaron homólogos utilizados comúnmente en investigación que serán los que finalmente se utilicen en el laboratorio para las pruebas de contención y descontaminación [41].

A continuación, se muestra un listado de algunos de los agentes químicos clásicos utilizados en guerras a lo largo de la historia y sus propiedades más relevantes para su

análisis y selección de un simulador adecuado de acuerdo a los objetivos con los que se planteó el proyecto COUNTERFOG (Tabla III).

Tabla III. Propiedades fisicoquímicas de agentes de guerra clásicos genéricos [55-57].

Agente Químico	Abrev.	$P_m / g \cdot mol^{-1}$	K_H	$P_e / ^\circ C$	$P_v / mm\ Hg$	$S / mg \cdot l^{-1}$
Gas mostaza ($C_4H_8Cl_2S$)	HD	159	$9.8 \cdot 10^{-4}$	218	0.11	684
Tabún ($C_5H_5N_2O_2P$)	GA	162	$6.5 \cdot 10^{-7}$	248	0.057	$7.2 \cdot 10^4$
Sarín ($C_4H_{10}FO_2P$)	GB	140	$3.8 \cdot 10^{-4}$	158	2.1	$1.0 \cdot 10^6$
Somán ($C_7H_{16}FO_2P$)	GC	182	$1.9 \cdot 10^{-4}$	198	0.4	$2.1 \cdot 10^4$
VX ($C_{11}H_{26}NO_2PS$)	VX	267	$1.4 \cdot 10^{-7}$	292	$7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^4$

2.1.3.2.1 Efectos de los agentes químicos de guerra

En este apartado se describen algunos de los principales efectos de los agentes químicos de guerra [5, 58].

Los pertenecientes al grupo de los agentes vesicantes, como el gas mostaza o la lewisita, son sustancias alquilantes que al contacto con la piel pueden producir irritación y ampollas. Llegan a producir graves quemaduras. Afectan también en gran medida a los ojos y al tracto respiratorio. Se consideran también sustancias carcinógenas y hay que tener presente que algunos de los productos de degradación del gas mostaza conservan una elevada toxicidad lo que les hace muy dañinos.

El grupo de los agentes nerviosos, G - Agent (GA, GB, GC) y los VX, son los compuestos químicos más tóxicos y de efecto más rápido. El VX es muy peligroso, ya que no tiene olor, ni sabor y es un líquido incoloro. Los efectos que producen este tipo de agentes neurotóxicos son muy parecidos a los pesticidas organofosforados. Al contacto con la piel pueden producir espasmos musculares, irritación y quemaduras. Su inhalación puede causar rinorrea, broncoconstricción, tos, dolores de cabeza, náuseas, vómitos, pérdida de coordinación y la muerte. Este tipo de agentes afectan al sistema nervioso, causando entumecimiento, hormigueo y debilidad en las manos y los pies. A largo plazo son mutagénicos y afectan a la reproducción. El GA (tabún) presenta un ligero olor afrutado. Sus efectos son muy similares a los que produce el agente VX. A los 15 min desde la exposición o contacto causa la muerte. El GB (sarín) se asemeja a pesticidas como el malatión y como en los casos anteriores ataca al sistema nerviosos. La muerte suele producirse como resultado de la asfixia debido a la imposibilidad del correcto funcionamiento de los músculos implicados en la respiración. El GD (somán) se trata también de un agente nervioso volátil, corrosivo, transparente y casi sin color. Es el más letal y más denso que el sarín y el tabún, causando efectos similares.

2.1.3.2.2 Simuladores químicos seleccionados

Los simuladores que se utilizarán en futuras pruebas en el COUNTERFOG - Lab fueron seleccionados en base a su estructura molecular y propiedades fisicoquímicas. De esta manera, el agente sustituto ideal imitaría todas las propiedades químicas y físicas relevantes del agente sin sus propiedades toxicológicas asociadas. Aunque se han seleccionado varios compuestos como sustitutos de los CWA, ningún compuesto

individual es ideal porque un solo simulador no puede representar satisfactoriamente todas las propiedades finales de un CWA dado. Debido a esto se propuso una serie de productos químicos diferentes que se utilizarán como simuladores CWA en función de alguna propiedad físico-química de interés, tales como, hidrólisis, sorción, biodisponibilidad y volatilización. En la Tabla IV, se muestran los grupos de agentes más relevantes con sus correspondientes sustitutos generalmente aceptados en la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN).

La selección de los simuladores se basa en las siguientes variables:

- Punto de ebullición.
- Solubilidad.
- Constante de Henry (K_H).
- Estructura química y grupos.
- Peso molecular.

Tabla IV. Propiedades de los diferentes agentes químicos y sus sustitutos [55].

Agente Químico	Abrev.	$P_m/\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	K_H	$P_e/^\circ\text{C}$	$P_v/\text{mm Hg}$	$S/\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$
Tabún ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_2\text{O}_2\text{P}$)	GA	162	$6.5\cdot 10^{-7}$	248	0.057	$7.2\cdot 10^4$
Sarín ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{FO}_2\text{P}$)	GB	140	$3.8\cdot 10^{-4}$	158	2.1	$1.0\cdot 10^6$
Somán ($\text{C}_7\text{H}_{16}\text{FO}_2\text{P}$)	GC	182	$1.9\cdot 10^{-4}$	198	0.4	$2.1\cdot 10^4$
Diisopropil metilfosfonato	DIMP	180	$1.8\cdot 10^{-3}$	121	0.277	$1.5\cdot 10^3$
Dimetil metilfosfonato	DMMP	124	$5.3\cdot 10^{-5}$	181	0.96	$1.0\cdot 10^6$
Éter monometílico de propilenglicol	DPGME	148	$4.7\cdot 10^{-8}$	188	0.55	$1.0\cdot 10^6$
Diisopropil fluorofosfonato	DFP	184	5.3	183	0.58	$1.5\cdot 10^4$
Trietilfosfato	TEP	182	$6.1\cdot 10^{-5}$	215	0.39	$5\cdot 10^5$
Gas mostaza ($\text{C}_4\text{H}_8\text{Cl}_2\text{S}$)	HD	159	$9.8\cdot 10^{-4}$	218	0.11	684
Sulfuro de 2-cloroetil etilo	CEES	125	$1.5\cdot 10^{-2}$	157	3.4	1062
Sulfuro de 2-cloroetil fenilo	CEPS	173	$3.0\cdot 10^{-3}$	257	$1.9\cdot 10^{-2}$	84
Salicilato de metilo	MS	152	$4.0\cdot 10^{-3}$	223	0.04	700
VX ($\text{C}_{11}\text{H}_{26}\text{NO}_2\text{PS}$)	VX	267	$1.4\cdot 10^{-7}$	292	$7\cdot 10^{-4}$	$3\cdot 10^4$
2-[(dimetoxifosforotioil)sulfanil] butanodioato de dietilo	Malatión	330	$2.0\cdot 10^{-7}$	156	$3.4\cdot 10^{-6}$	143
O,O-dietil-O-4-nitrofeniltiofosfato	Paratión	291	$1.8\cdot 10^{-5}$	375	$6.7\cdot 10^{-3}$	11
Lewisita	L	207.32	$7.7\cdot 10^{-2}$	196	0.58	500
Óxido de fenilarsina	PAO	168.03	$4.5\cdot 10^{-4}$	195	$2.54\cdot 10^{-2}$	1800

De la tabla propuesta inicialmente (Tabla IV) se preseleccionaron los compuestos resaltados en negrita dada su baja toxicidad y su posibilidad de utilizarse en el laboratorio. Dado que el grupo de agentes G comprende varios compuestos con diferentes características fisicoquímicas, para realizar el estudio se seleccionaron dos sustitutos, el trietilfosfato (TEP) que tienen una estructura molecular central similar a estos agentes con el grupo funcional PO y el éter monometílico de propilenglicol (DPGME), cuyos parámetros físicos permiten cubrir el rango de punto de ebullición, K_H y solubilidad. A continuación, se presentan las estructuras de dichos compuestos (ver Figura 31).

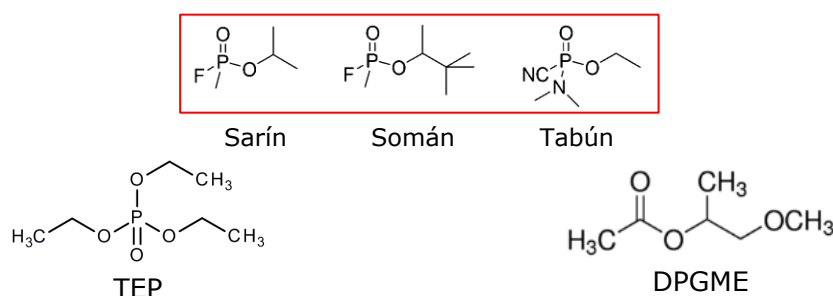


Figura 31. Estructuras de diferentes CWA y sus sustitutos propuestos [55].

Con respecto al gas mostaza (HD), el 2-hidroxibenzoato de metilo o salicilato de metilo (MS) tiene un punto de ebullición, K_H y solubilidad muy próxima al compuesto original. Aunque la funcionalidad química (sulfuro – etil – cloro) de los otros dos sustitutos propuestos, el sulfuro de 2-cloroetil fenilo (CEPS) y el sulfuro de 2-cloroetil etilo (CEES), es similar al gas mostaza, su alta toxicidad no permite su uso en el laboratorio. Además, MS y HD muestran características similares de absorción en la piel. A continuación, se muestran las estructuras de cada uno de ellos (Figura 32).

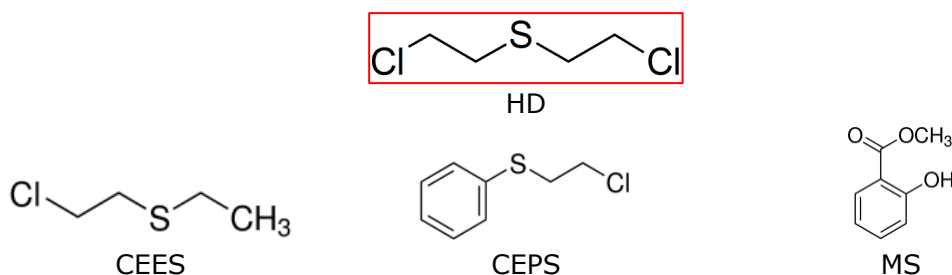


Figura 32. Estructuras de la HD y sus sustitutos propuestos [55].

El cuanto a los simuladores de los agentes VX y lewisita, no se seleccionaron ninguno de los candidatos mostrados en la Tabla IV ya que sus toxicidades continuaban siendo elevadas y no podían ser utilizados en el COUNTERFOG – Lab.

2.1.3.3 Agentes biológicos

Existen numerosas formas de emplear estos tipos de agentes biológicos ya sea en forma de bacteria, toxina, parásito o virus. Por cuestiones meramente tecnológicas, lo más común es la utilización de bacterias y toxinas [3]. Los efectos que producen en la salud varían en función de la bacteria o toxina utilizada, por lo que no se pueden generalizar efectos como en los casos anteriores. Sería necesario un análisis pormenorizado de cada uno de ellos.

Además de por el tipo de agente biológico, estos pueden a su vez clasificarse en función de su modo de liberación. Por un lado, pueden fabricarse aerosoles con las partículas infecciosas o toxinas seleccionadas. Al tener un tamaño de partícula muy pequeño penetran en el torrente sanguíneo a través de los pulmones. Esta vía sería un modo de diseminación acertado para viruela, ántrax o ébola. Por otro lado, puede elegirse una vía de dispersión alimentaria, es decir, contaminar agua o comida. Unos adecuados controles alimenticios y una filtración y cloración del agua reducen esta vía en gran medida. También puede darse una exposición directa de la piel al agente en

cuestión, y por último, se podría diseñar un vector vivo, como podría ser un mosquito, garrapata o pulga infectada con el agente desarrollado [3, 4].

En cuanto a los agentes existentes susceptibles de ser utilizados, son muy numerosos. Un ejemplo de ellos son: tularemia, ántrax, viruela, plaga bubónica, virus que produzcan fiebre hemorrágica y toxinas botulínicas. El ántrax ha sido uno de los candidatos elegidos para este tipo de actos a lo largo de la historia. Se buscan patógenos frente a los cuales no existan vacunas, sean fáciles de diseminar y se contagien también con facilidad. En relación con las toxinas, a pesar del gran número existente, sólo hay tres que son tenidas en cuenta a la hora de un posible ataque biológico. Éstas son las siguientes [4]:

- La toxina botulínica tipo A del *Clostridium botulinum* (como la más importante de las siete existentes).
- La enterotoxina estafilocócica tipo B del *Staphylococcus aureus*.
- La ricina extraída de la semilla del ricino.

2.1.3.3.1 Simuladores biológicos seleccionados

En cuanto a la elección de posibles simuladores, este estudio ha corrido a cargo de biólogos y microbiólogos especialistas de la universidad de Alcalá de Henares (UAH) [59]. En concreto, para los ensayos se seleccionó como simulador al *Bacillus anthracis*. Se seleccionaron endosporas virulentas *B. anthracis* de dos especies, *B. thurigiensis* y *B. atropheus*. El motivo de la selección se debió a la facilidad de crecimiento y por el empleo de este tipo de cepas altamente virulentas en ataques bioterroristas. Además, son esporas resistentes, por lo que se puede evaluar el efecto biocida del sistema de respuesta COUNTERFOG diseñado.

2.1.4 Sistemas de detección y respuesta ante agentes NRBQ

Actualmente, no existe ningún sistema de contramedida que pueda prevenir o al menos actuar de forma automática ante un ataque de índole terrorista en la que se utilice algún agente NRBQ o ante un accidente industrial.

A continuación, se va a realizar una exposición de las técnicas actuales de detección de este tipo de agentes. Y además, se van a estudiar los procesos de lavado y descontaminación de zonas contaminadas, para la implementación de los productos utilizados en estos procesos en el sistema de contramedidas COUNTERFOG diseñado.

2.1.4.1 Agentes NR

2.1.4.1.1 Detección de radiaciones ionizantes

Existen fundamentalmente dos mecanismos físicos de funcionamiento de los equipos de detección de radiación [60]. Estos son los siguientes:

- Detectores de ionización. Se basan en la ionización de los átomos de un material aislante. La ionización provoca que el material deje de ser aislante y se vuelva conductor pudiéndose saber la intensidad de la radiación en base a la corriente generada.
- Detectores por excitación. Se trata de equipos de centelleo. En ellos se miden los fotones emitidos por un material al haber sido excitado a través de la radiación recibida.

Por otro lado, estos detectores se pueden subdividir en función de su retardo en la medida, en función de su uso (ya midan tasa de exposición o dosis) y desde el punto de vista operacional (in situ, standoff o remoto). Por ejemplo, para el control del tráfico ilícito de material radiactivo suelen utilizarse cuatro equipos básicos; los portales fijos de detección, los detectores de radiación personal, los detectores portátiles de radiación gamma y de neutrones y los dispositivos portátiles de identificación de radionucleídos [37].

En el caso de los ensayos previstos en el laboratorio, debido a la utilización de un simulador que no emite radiación, no se pueden utilizar estas técnicas de detección. Es por ello, que al utilizarse partículas sólidas, se va a dotar al laboratorio de un detector de partículas para los ensayos con NR (ver punto 3.7.5.2), lo que nos proporcionará la información necesaria para saber si la atmósfera está limpia o no, dada la deposición de las mismas con el tiempo por efecto de la gravedad o debido al sistema de contramedida COUNTERFOG diseñado.

2.1.4.1.2 Sistemas actuales de respuesta NR

No existen sistemas de respuesta automáticos instalados en edificios públicos, estaciones de tren, etc, que detecten y actúen por sí solos sin necesidad de que acuda personal de emergencias. Es por ello, que las medidas de respuesta se toman a posteriori perdiendo un tiempo valioso, que permite avanzar a la pluma de contaminante y afectar a un mayor área y a un mayor número de personas [60].

En el caso de contaminación personal, es necesaria la administración inmediata de yodo estable en caso de posible exposición a yodo radiactivo. Las zonas contaminadas del cuerpo deben lavarse con agua tibia y jabón [61, 62]. En cuanto a suelos contaminados en caso de emergencia, se busca reducir la dosis de los mismos. Para ello, se extraen las capas más externas, que se tratan como residuos por un gestor autorizado por el CSN (Consejo de Seguridad Nuclear), y se reemplaza con tierra no contaminada, y finalmente, si es necesario, se blindo la superficie con planchas de hormigón. Los procesos a seguir en función del tipo de accidente y área contaminada se describe en informes técnicos del OIEA [63]. Los residuos generados se tratan en base a al RD 102/2014 para la gestión segura de combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos [64].

2.1.4.2 Agentes Químicos

2.1.4.2.1 Detección de CWA

La mayoría de los métodos utilizados hoy en día están basados bien en tecnología IR (Infrarroja) o bien láser [65]. Desde un punto de vista operacional, los podemos clasificar en in situ y standoff. A su vez, este tipo de equipos pueden ser utilizados mediante control remoto. Los equipos pueden ser portátiles, estacionarios, montados en vehículos o fijos [40].

En cuanto a los detectores in situ, las técnicas utilizadas mayoritariamente son: técnicas colorimétricas [66], espectrometría por movilidad iónica, fotometría de llama, fotoionización y ondas acústicas superficiales.

Los detectores a distancia se centran en dos tipos, los pasivos, los cuales se basan en las propiedades espectrales de los agentes químicos en la región del IR, y los activos, que miden el impacto en la atmósfera de un láser remoto como fuente de excitación. Entre los equipos de carácter comercial se pueden encontrar: equipos básicos de espectrometría IR, equipos de espectrometría IR con transformada de Fourier, espectroscopia de absorción infrarroja con láser de cascada cuántica y CO₂ DIAL.

Para la correcta identificación, se necesitaría realizar una cromatografía de gases con un espectrómetro de masas, una espectrometría infrarroja con transformada de Fourier o una espectroscopia Raman.

2.1.4.2.2 Sistemas actuales de respuesta frente a CWA

Una vez detectado e identificado el agente químico, puede actuarse en consecuencia, ya que no se dispone de sistemas de respuesta automáticos genéricos. Por lo general, para la descontaminación de superficies y en algunos casos personas contaminadas con este tipo de agentes suelen utilizarse los siguientes medios [40]:

- Agentes neumotóxicos o sofocantes (Cl₂, fosgeno, etc). Se utiliza la solución comercial DS2 (70 % dietilentriamina, 28 % etilenglicolmonometileter y 2 % de hidróxido de sodio) o agua con soluciones alcalinas.
- Agentes vesicantes (HD y L). Se utilizan soluciones de lejía, la solución comercial DS2 o polvos absorbentes neutros.
- Agentes nerviosos (G Agents). El tabún se neutraliza con agua formando ácido fosfórico (no tóxico). Además, suele utilizarse hipoclorito y grandes cantidades de agua o soluciones comerciales (M291 o M258A1). Para el resto (GB, GD y VX), se utiliza agua jabonosa.

2.1.4.3 Agentes Biológicos

2.1.4.3.1 Detección de agentes biológicos

Como en los casos anteriores, los sistemas de detección pueden ser in situ, standoff o remotos. En el caso de estos agentes, el número de detectores comerciales es reducido, detectan unos tipos de patógenos limitados, dan alarmas falsas y su coste es muy elevado [42].

En detectores in situ, se tienen detectores de aerosoles biológicos que requieren de una sensibilidad elevada y una gran especificidad, debido al gran fondo biológico. Se utilizan sistemas de detección puntual formados principalmente por 4 fases:

- Trigger. Simplemente identifica un aumento en el número de partícula en el ambiente. Algunos permiten identificar entre partículas biológicas o no biológicas antes de encender la alarma. Algunos de los elementos más empleados son APS (Aerodynamic Particle Sizer), FPS (Fluorescence Particle Sizer) y la citometría de flujo.
- Colector. Da la alarma ante una concentración de partículas en el exterior. Las recoge y concentra. Puede contar con tecnología ciclón o tecnología de impacto.
- Detector. Analiza si las partículas son inorgánicas o biológicas. Esto puede realizarse mediante luminiscencia (fluorescencia, quimioluminiscencia o bioluminiscencia) o fotometría llama.
- Identificación. La identificación puede ser llevada a cabo mediante espectrometría masa, técnicas inmunoanalíticas o técnicas de biología molecular.

2.1.4.3.2 Sistemas actuales de respuesta frente a agentes biológicos

En cuanto a los sistemas de respuesta, los tratamientos a personas dependen del agente en cuestión, pero en cuanto a la limpieza de materiales o emplazamientos lo podemos agrupar de la siguiente forma [42]:

- Bacterias. Se destruyen fundamentalmente con calor, desinfectantes, cloro, lejía o etanol. Las superficies pueden ser descontaminadas con formaldehído (0.1%), glutaraldehído o fenol (0.5%).
- Virus. Son eliminados con desinfectantes comunes (hipoclorito cálcico, lejía), solventes polares lipofílicos, como el cloroformo y también con amonio cuaternario, calor seco (56 °C durante 30 min) o luz ultravioleta. Las superficies, como en el caso anterior, pueden ser descontaminadas con formaldehído (0.1 %), glutaraldehído o fenol (0.5 %). Los objetos pequeños se descontaminan en autoclave.
- Toxinas. Suele utilizarse lejía diluida o agua jabonosa.

2.2 Fuego

Al inicio de la presente memoria de investigación se comentó cuáles eran los objetivos del sistema COUNTERFOG, el cual pretende dar respuesta ante un ataque NRBQ (componentes estudiados anteriormente) y muy probablemente combinados con fuego. Por este motivo, este apartado se dedica a describir y evaluar las propiedades y riesgo del fuego, así como de los sistemas de respuesta existentes.

Para poder actuar ante el fuego, hay que conocer los pilares básicos para la existencia del mismo y conocer los puntos clave a los que atacar para conseguir extinguir un incendio. Lo fundamental a este respecto es entender el tetraedro del fuego (Figura 33). El fuego, normalmente en el medio ambiente, se produce como consecuencia de reacción de oxidación exotérmica auto-mantenida. Para que un fuego pueda desarrollarse necesita cuatro componentes fundamentales, combustible (compuesto susceptible de arder), comburente (oxígeno), calor (energía de activación) y una reacción en cadena posterior [67].

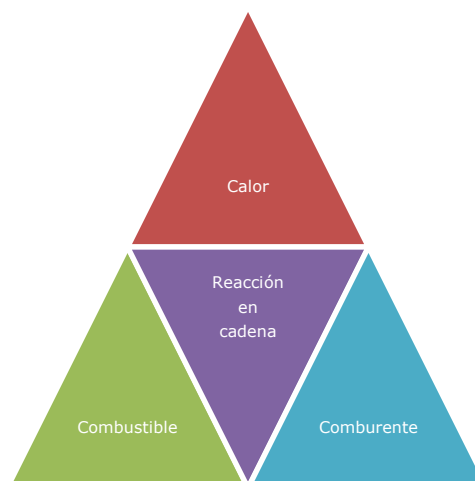


Figura 33. Tetraedro del fuego.

Si uno de los componentes del tetraedro del fuego falla, puede extinguirse un incendio. Luego la siguiente pregunta a resolver es cómo se puede eliminar cada uno de los componentes fundamentales de tetraedro del fuego [67]:

- **Combustible.** Para actuar frente al combustible la única solución es la retirada del mismo o su dilución, siendo este hecho muy complicado en la mayoría de los casos. Esta vía se denomina “eliminación”.
- **Comburente.** En el caso del comburente, los medios de extinción van a intentar sofocar o asfixiar el fuego desplazando el oxígeno y/o impidiendo que este llegue a la superficie del combustible donde se está produciendo la combustión mediante su inertización. Esta vía se denomina “sofocación” o “inertización”.
- **Calor.** En cuanto al calor, se actúa frente a este vértice enfriando, es necesario retirar el calor lo más rápidamente posible. Esta vía se denomina “enfriamiento”.

- Reacción en cadena. Y por último, para actuar frente a la reacción en cadena hay que evitar la formación de radicales libres y que estos lleguen a alimentar la reacción en cadena de la combustión. Esta vía se denomina “inhibición”.

2.2.1 Sistemas de respuesta frente al fuego

A continuación, se van a exponer algunos de los sistemas fijos antiincendios [68] más populares comercialmente para evaluar su posible utilización frente a agentes NRBQ.

➤ Extintores.

Existen diferentes tipos de extintores en función del tipo de fuego. El tipo de fuego se clasifica de la siguiente manera: A (fuegos sólidos), B (fuegos líquidos), C (fuegos de gases) y D (fuegos de metales) [69, 70]. Esta clasificación varía en función de la normativa consultada. Los extintores comúnmente utilizados son [67, 69, 71]:

- Extintores de polvo polivalente ABC: se trata de polvo de monofosfato de amonio. El polvo desplaza el oxígeno e inhibe las reacciones en cadena de la combustión, siendo esta su principal propiedad. Tiene la ventaja de que no conduce la electricidad, pero es irritante y anula la visibilidad. Es difícil de limpiar después de su uso.
- Extintores de agua (fuegos AB): el principio básico de este extintor es el enfriamiento. Al evaporarse el agua aplicada, se enfría el combustible y este no supera la energía de activación para seguir ardiendo, y además, los vapores de agua desplazan el oxígeno. Este efecto se incrementa a menor tamaño de gota de agua, presentando los extintores de agua pulverizada una mayor eficacia. En ocasiones estos extintores suelen ir acompañados de distintos aditivos para aumentar su efectividad. La principal desventaja que presentan es la conducción de la electricidad y su corto alcance.
- Extintores de espuma: suelen utilizarse para fuegos líquidos (B), aunque también pueden utilizarse en determinados fuegos sólidos (A). Actúan sofocando el incendio al no dejar llegar el comburente a la superficie del combustible, y a su vez, impide la salida de vapores que puedan originar una combustión. Al estar presente, como en el caso anterior el agua, también enfría la superficie al evaporarse. Al igual que con los extintores de agua no pueden utilizarse para fuegos eléctricos.
- Extintores CO₂: Este tipo de extintor actúa desplazando el oxígeno. Suele emplearse en espacios cerrados y fuegos eléctricos como los de un cuadro eléctrico. Presentan la desventaja de ser tóxicos y no poder utilizarse en espacios abiertos debido a la pérdida de efectividad. Además, se trata de un gas de efecto invernadero.

➤ Sistemas fijos de espumas.

El uso principal de este tipo de agente extintor es en fuegos de 2D de líquidos combustibles. Suele ser el sistema de emergencia que rodea a piscinas de líquidos combustibles [72]. Estas espumas se extienden sobre el líquido inflamable desplazando el oxígeno, refrigerando mediante la evaporación de agua y manteniendo retenidos los vapores inflamables, por lo que frena la reacción en cadena. Su principal desventaja es que presentan un uso muy determinado.

➤ Sistemas automáticos de gases.

Los sistemas de este tipo son efectivos en espacios cerrados ya que los gases van a llenar el espacio por completo desplazando el oxígeno y asfixiando así el incendio. Este tipo de sistemas son automáticos y suelen utilizarse para proteger equipos eléctricos. Las principales desventajas que presentan son las siguientes: resultan asfixiantes, sólo pueden utilizarse en espacios cerrados y en algunos casos contribuyen al efecto invernadero. Algún ejemplo de este tipo de sistemas son: los gases halocarbonados (los cuales se están retirando debido a su efecto invernadero), los gases inertes (nitrógeno y argón puros o en mezcla con o sin CO₂) como por ejemplo la marca registrada INERGEN® (52 % de N₂, 40 % de Ar y 8 % de CO₂) [73] y el NOVEC® 1230 como compuesto más novedoso [74]. Se trata de una cetona fluorada más efectiva que ninguno de los anteriores y sin efecto invernadero. Es conveniente destacar como principal desventaja de este compuesto que está contraindicado en presencia de CWA y en contacto con H₂O o humedad genera compuestos altamente tóxicos.

➤ Sprinklers.

Los sprinklers son rociadores automáticos de agua [75]. Suelen ir acompañados de un bulbo termosensible que se rompe por acción del calor de un fuego y se dispara automáticamente. Esto tiene la ventaja de que pueden activarse por zonas únicamente donde se necesiten. El tamaño de gota de agua es superior a 1 mm lo que supone un perjuicio sobre los equipos que incide, además presentan un elevado consumo de agua. Al ser agua el agente extintor, conduce la electricidad, por lo que puede ser peligroso en un incendio eléctrico. Este agente extintor tiene como principio básico de actuación el enfriamiento.

➤ Agua nebulizada.

El agua nebulizada es una mejora de los sistemas comunes de rociadores automáticos, ya comentados anteriormente, y también se presenta como sustituto de las instalaciones fijas de gases. Este tipo de agente extintor basa su eficacia en el tamaño de gota, a menor tamaño de gota, mayor es la superficie de contacto, y por lo tanto, mayor es la capacidad de absorción de calor y por consecuencia el poder de extinción [76, 77]. Además, para que estas pequeñas gotas sean efectivas es necesario que se presurice el sistema para que estas salgan a elevadas velocidades y puedan llegar a la base de un posible incendio. En el punto 2.3, podremos ver en detalle todas las características del agua nebulizada.

En general, el agua nebulizada presenta las siguientes ventajas como agente extintor: es un agente económico, sus consumos de agua son mínimos (la décima parte de un sistema de sprinkler), no conduce la electricidad, es inocuo para el personal y los equipos expuestos, no resulta asfixiante, es capaz de arrastrar el humo y depositar gases tóxicos y partículas de la combustión, posee una alta capacidad de enfriamiento, puede utilizarse en espacios cerrados y abiertos, presenta un mantenimiento sencillo, es respetuoso con el medioambiente, puede realizar descargas múltiples y se recarga fácilmente [78].

En la Tabla V, se presenta un resumen de los métodos actuales de extinción. A partir de estos datos se deduce que los sistemas más efectivos son las espumas, los gases y el agua nebulizada. Es importante recordar que hay sistemas, como los gases, que no pueden ser utilizados en presencia de seres vivos al desplazar el oxígeno y son más efectivos en espacios cerrados. Por otro lado, las espumas están recomendadas principalmente para fuegos de 2D. Como conclusión del análisis, destacar que son los sistemas de agua nebulizada los que presentan las mejores cualidades para su aplicación en las condiciones que se consideran en esta memoria de investigación.

Tabla V. Resumen de las propiedades de cada uno de los medios de extinción más destacados de cada agente así como la clase de fuego para los cuales están más recomendados.

	Sofocación	Enfriamiento	Inhibición	Fuego	Contraindicación
Extintor ABC	✓	✗	✓	ABC	Corrosivo
Extintor CO ₂	✓	✗	✗	B Eléctricos	Asfixia Espacios abiertos Efecto invernadero
Extintor H ₂ O	✓	✓	✗	A	Conductor electricidad
Espumas	✓	✓	✓	AB	Válido fuegos 2D
Gases	✓	✗	✗	ABC Eléctricos	Asfixia Espacios abiertos
NOVEC	✓	✓	✗	ABC	Asfixia Espacios abiertos
Sprinkler	✗	✓	✗	A	Elevado consumo de agua. Daño equipos
Agua nebulizada	✓	✓	✓	ABC	-

2.2.1.1 Boquillas comerciales de agua nebulizada

Una vez decidido el sistema considerado, es necesario conocer qué tipo de boquillas existen en el mercado y si pueden dar respuesta a los requerimientos exigidos. Las boquillas que mejores propiedades presenten (es decir, versatilidad, tamaño de gota generado, posibilidad de utilizar diferentes disoluciones, resistencia química, etc.) serán las que se utilicen como referencia para el desarrollo de las nuevas boquillas COUNTERFOG. Entre las casas comerciales encontradas, destacan las siguientes:

- Tyco [79]. Presentan diferentes tipos de boquillas en función de la aplicación. Por un lado sistemas de Aquamist Ultra Low Flow (ULF) recomendada para protección de maquinaria, túneles, hospitales y hoteles. Por otro lado, las boquillas Aquamist fog, recomendadas para protección de maquinaria, archivos, escaleras mecánicas y trenes. Y por último, las Aquamist Sonic para protección de maquinaria. Estas últimas utilizan N_2 como agente impulsor. Las Aquamist ULF, utilizan bajas presiones de agua (0.7 – 1.6 MPa) y bajos caudales de agua, mientras que las boquillas Aquamist Fog trabajan entre 7 – 20 MPa. Estas boquillas son las más interesantes para nuestra aplicación, ya que producen una niebla muy fina y puede utilizarse en multitud de espacios. Las presiones de trabajo de estas boquillas son elevadas, por lo que podría ser objeto de estudio y rediseño.
- LPG AQUAFOG [80]. Poseen un sistema similar al Aquamist Fog de Tyco, utilizando elevadas presiones de agua para generar nieblas de tamaños de gota muy pequeños que puedan aplicarse a casi cualquier tipo de fuego.
- BEX spary nozzles [81]. Presentan un catálogo de diversas boquillas, de distintos materiales y que generan diferentes conos compuestos por tamaños variables de gota. Las boquillas que más se aproximan al agua nebulizada, y a lo que se espera sea el punto de partida de las boquillas COUNTERFOG, son la serie WF.
- PNR [82, 83]. En sus catálogos realizan un estudio muy extenso de las boquillas de agua nebulizada. Presentan diferentes tipos de boquillas en función del tipo de cono que se quiere generar y los materiales a utilizar. Los materiales que se utilizan industrialmente han sido un buen punto de partida para el estudio de materiales de las boquillas presentado en el punto 4.2 de los resultados. La mayoría de las boquillas ofrecidas por PNR son boquillas de uso industrial y no específicamente para incendios, pero la base teórica es aplicable.
- Marioff [76]. Es una empresa líder en el sector de boquillas de agua nebulizada (Hi-Fog). La información disponible de sus boquillas es reducida debido a estar sujetas a diversas patentes.

La revisión del estado del arte demuestra que esta tecnología está en desarrollo. Las boquillas de agua nebulizada comerciales se basan en la utilización de presiones de agua muy elevadas. Una mejora cuantitativa sería el diseño de sistemas que permitan la generación de nieblas con un tamaño de gota de agua similar a las comerciales, pero a presiones de trabajo menores para simplificar las instalaciones y abaratar los costes económicos.

2.3 Agua nebulizada

Los sistemas actuales tal y como están planteados no son aptos para su utilización frente a agentes NRBQ. Del mismo modo, estos sistemas de extinción están sometidos a patentes de alto coste económico. Siendo así, es necesario realizar un nuevo diseño, que mejore los actuales y permita implementar aditivos que favorezcan su empleo ante agentes NRBQ.

2.3.1 Clasificación y tipos de niebla

El agua es uno de los primeros agentes extintores utilizados por la humanidad al poseer una capacidad de enfriamiento de $2.6 \text{ MW} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Cuando enfrentamos el agua a un fuego directo, este poder se reduce a $0.84 \text{ MW} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, lo que supone una pérdida muy importante de la eficiencia. Por esta razón, y para favorecer la acción enfriadora del agua, se optó por disminuir la distribución del tamaño de las gotas de agua hasta el punto en el que esa eficiencia sea máxima. Pero es importante remarcar que si se disminuye demasiado la distribución del tamaño de gota, puede darse el efecto contrario, que las gotas se evaporen mucho antes de llegar a la base del fuego y su efecto se vea reducido.

Además, será necesario aumentar la velocidad de gota, para que compense su pequeña masa y la gota de agua pueda atravesar el penacho de gases calientes y llegue a la base del fuego.

2.3.1.1 Clasificación del agua nebulizada en base a las normativas

La norma americana NFPA (National Fire Protection Association) 750 sobre agua nebulizada [84], normativa pionera en este aspecto, establece que para que una niebla sea considerada agua nebulizada el 99 % de sus partículas ha de tener un tamaño inferior al 1 mm. Además, tanto la normativa americana NFPA 750 [84], como la británica [85] y la española UNE-CEN/TS 14972 [77], establecen una clasificación en función de la presión de trabajo de los equipos para conseguir esa niebla con un $D_{0.99} < 1000 \mu\text{m}$ a 1 m de distancia en un plano desde la boquilla. La clasificación en función de la presión de descarga de la norma española es la siguiente [77]:

- Sistemas de baja presión: $P \leq 1.25 \text{ MPa}$.
- Sistemas de media presión: $1.25 \text{ MPa} < P < 3.5 \text{ MPa}$.
- Sistemas de alta presión: $P \geq 3.5 \text{ MPa}$.

Estas boquillas pueden ser automáticas, no automáticas o híbridas. En las normativas citadas, se recogen los distintos tipos de boquillas, así como, la información mínima requerida de dichas boquillas y de su instalación presurizada, que debe estar adecuadamente certificada. Además, se presentan los diferentes ensayos que han de superar las boquillas instaladas de agua nebulizada.

Otra clasificación, no tan estandarizada en la normativa pero también muy extendida, es en función del tipo de cono que generan las boquillas. El cono de niebla puede ser hueco o bien puede ser un cono sólido de niebla. Los ángulos de los mismos los marcará la presión de trabajo y en definitiva el caudal de agua requerido por la boquilla [83].

2.3.1.2 Técnicas básicas para la generación de agua nebulizada

A continuación, se exponen de manera concisa las técnicas básicas que se utilizan para la generación de nieblas. Se podrían establecer cinco categorías en función del tipo de boquilla como son [83]:

- Boquillas hidráulicas. Se basan principalmente en el paso de agua a presión por un orificio pequeño. Al disminuir la sección, el agua aumenta su velocidad y el chorro de agua se vuelve inestable y se rompe en pequeñas gotas.
- Boquillas de flujo turbulento (rotacional). En este tipo, el agua antes de salir por el orificio previsto adquiere un movimiento rotacional a elevada velocidad. Este tipo de boquillas pueden ser diseñadas para generar un cono de niebla sólido o uno hueco.
- Boquillas de impacto. En cuanto a las boquillas de impacto, el chorro de agua a presión se hace incidir directamente sobre una superficie correctamente diseñada que rompe el chorro en pequeñas gotas.
- Boquillas asistidas por aire, atomizadas. Utilizan aire u otro gas a alta velocidad que produce la atomización del agua. El agua bajo presión es introducido en la corriente de aire que rompe el chorro de agua y genera pequeñas gotas de agua. Este tipo de boquillas produce tamaños menores de gota que las boquillas anteriores. Esta categoría está muy desarrollada y existen diversas subclasificaciones que en parte mezclan funciones de los otros tipos de boquillas.
- Boquillas ultrasónicas. En este caso, se hace vibrar a una boquilla de Ti a una frecuencia en el intervalo de ultrasonidos (25 – 120 kHz). La distribución del tamaño de gota va a depender de la frecuencia empleada. Por ejemplo, para una frecuencia de 120 kHz se obtiene un diámetro medio de 17 μm . Las principales características de este tipo de boquillas son la generación de una gota fina, a bajas velocidades y con un bajo caudal. Los rangos de tamaño de partícula son muy pequeños y estables y su eficiencia en cuanto a agente extintor está a la altura de gases halogenados [86, 87].

Para cada uno de estos grupos existen diversas clases de boquillas, y lo más probable es que se utilicen técnicas combinadas [88].

2.4 ¿Qué utilizamos frente a un riesgo combinado?

Como se ha podido observar a lo largo de la introducción del presente trabajo de investigación, existe un vacío en sistemas de respuesta automáticos para incidentes NRBQ y, a su vez, para una posible combinación de agentes NRBQ y fuego. Sin embargo, los sistemas antiincendios, por su parte, sí están muy desarrollados. Las posibilidades son infinitas en función del tipo de fuego y de los materiales a proteger. La carencia de soluciones genéricas válidas para cualquier tipo de incidente que pueda acontecer, en lugares públicos o no, con personas presentes así como con posibles equipos electrónicos, llevó a la extrapolación de un sistema de respuesta automático antiincendios de elevada eficiencia, como es el agua nebulizada, a su aplicación frente a agentes NRBQ dispersos.

La revisión y estudios realizados por Y. Qin et al., colaboradores del proyecto COUNTERFOG de la Universidad de Strathclyde (STR) [89-91], dieron lugar a distintos pre-diseños de boquillas generadoras de agua nebulizada. En dichos estudios se modeló su comportamiento mediante simulaciones CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) con el programa ANSYS FLUENT [92], añadiendo un nuevo concepto respecto a los diseños de referencia, el de un tercer fluido. El sistema propuesto genera una niebla a partir de agua y aire, u otro agente propulsor, y además, por una nueva entrada a la boquilla permite introducir y mezclar con el fluido generador de la niebla aquellos aditivos que fuesen necesarios, o bien mezclarlos con la niebla ya generada. Este hecho permitirá la utilización de dichas boquillas en la lucha contra agentes NRBQ, pero respetando la premisa de que los aditivos introducidos han de ser inocuos para el ser humano.

Los sistemas diseñados por el grupo de investigación dirigido por el profesor Qin [89-91] son los que principalmente han servido de base para la realización de este trabajo de investigación.

3. Procedimiento experimental

3.1 Diseño y descripción del laboratorio

Dadas las características intrínsecas de este trabajo de investigación, fue necesario diseñar y construir un laboratorio donde se pudieran realizar los ensayos que permitieran determinar la efectividad de las contramedidas diseñadas y que se describen en los siguientes apartados. A este laboratorio (Figura 34) nos referimos en la presente tesis doctoral como COUNTERFOG – Lab. Para el diseño del laboratorio se tuvieron en cuenta, además de los requerimientos técnicos necesarios, la reglamentación de Prevención de Riesgos Laborales (PRL) vigente en nuestro país [94] y la normativa del Ministerio de Industria en relación a equipos de presión [95].

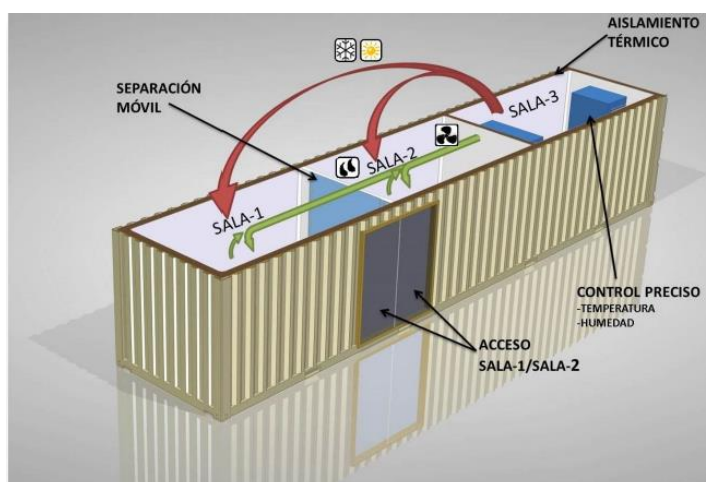


Figura 34. Esquema del COUNTERFOG – Lab [93].

El laboratorio presenta un diseño modular y está compuesto por dos salas de experimentación (sala 1 y sala 2) y una sala anexa (sala 3). Las salas 1 y 2 son a su vez cámaras climáticas diseñadas para reproducir condiciones controladas de temperatura (entre 0 - 40 °C) y humedad en su interior (entre 30 - 95 % de humedad relativa), mientras que la sala 3 aloja parte del equipamiento auxiliar del laboratorio como sistemas de frío y calor y generadores de humedad, así como los controles que permiten el manejo del laboratorio (Figura 34). Por otro lado, existen dos contenedores anexos (Figura 35), uno utilizado como almacén y otro que alberga los equipos de presión (registrados en industria [95]) que garantizan las presiones de trabajo adecuadas para aire y agua. Entre estos equipos se encuentra un compresor de aire, un depósito pulmón de aire de hasta 3 MPa de presión y dos depósitos de agua presurizados a la presión de trabajo necesaria (Figura 36).

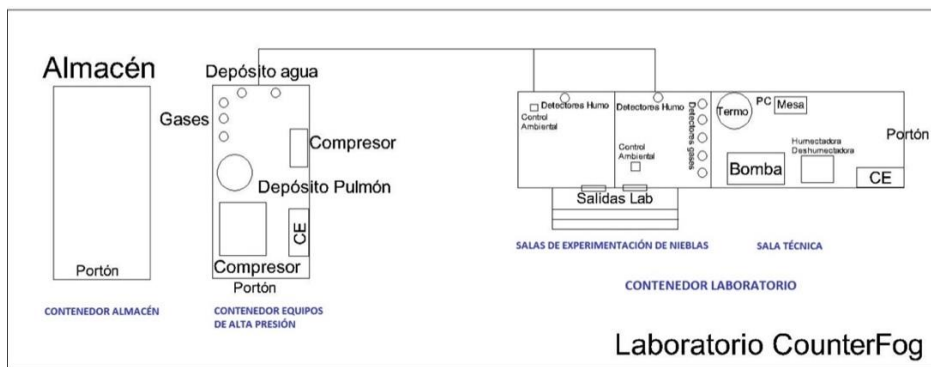


Figura 35. Esquema de la disposición de los equipos dentro del COUNTERFOG - Lab.

A continuación, se muestran una serie de imágenes del interior de este COUNTERFOG - Lab, en las que aparecen algunos de los equipos de operación más importantes (Figura 36).



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 36. Equipos y sistemas de control del COUNTERFOG - Lab. a) Sala 1 del laboratorio con boquilla F 1:2 instalada. b) Sala 3, con humectadora y deshumectadora, bomba de calor y bomba refrigeradora. c) Sistema de control del circuito de presión y detectores. d) Cuadro eléctrico, sistema de control de filtros y sistemas de adquisición de datos. e) Sala de equipos a presión con un compresor, depósito pulmón, dos depósitos presurizados de agua, compresor de aire y el sistema de canalizaciones de agua y aire.

En la construcción del laboratorio, el CIEMAT fue el encargado de seleccionar y acondicionar la ubicación (Figura 37).

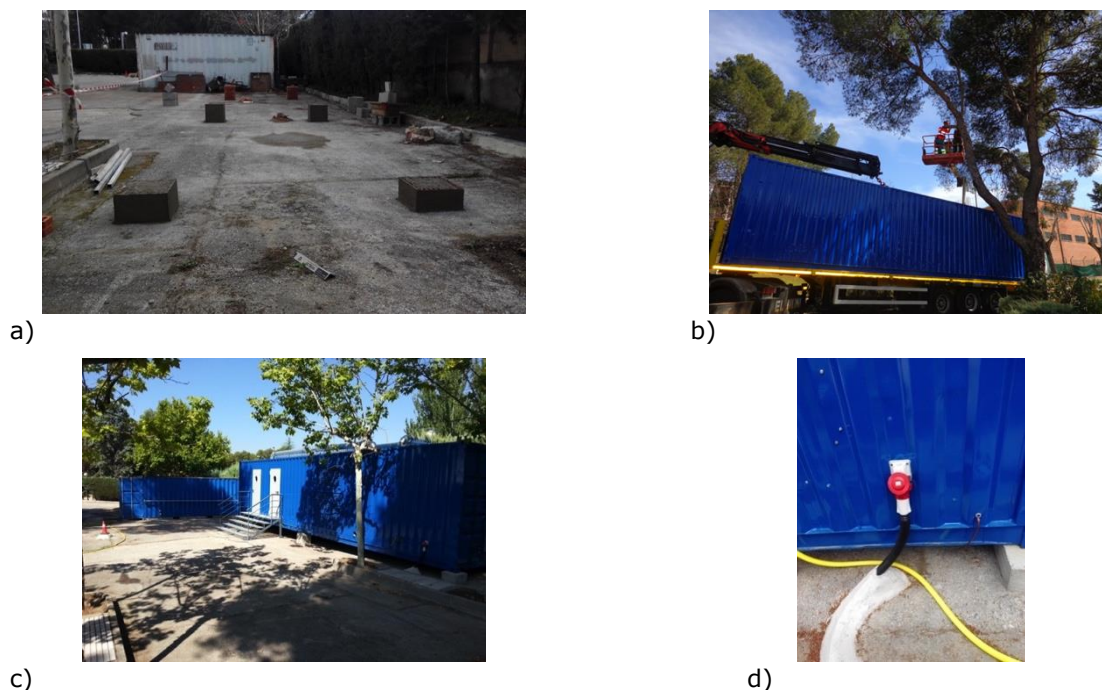


Figura 37. Instalación del laboratorio portátil COUNTERFOG y dotación de los principales servicios. a) Preparación del terreno. b) Instalación del laboratorio. c) Incorporación de accesos bajo normativa al laboratorio [94, 95]. d) Dotación de electricidad al COUNTERFOG - Lab.

Además, en las salas de ensayo 1 y 2, se instalaron, distintos sensores para controlar y almacenar las condiciones de operación de los ensayos (Figura 38). Los sensores son los siguientes; sensores de presión, caudal, temperatura, humo, CO, CO₂, SH₂ y C-H. Por otro lado, el laboratorio cuenta con un sistema de ventilación con filtros que permite realizar los ensayos con los diferentes simuladores elegidos. Se instalaron unos filtros de renovación de aire, así como, un depósito en la zona inferior para la recogida de efluentes (Figura 38).

En paralelo al diseño del laboratorio, su construcción e instalación, se fueron diseñando y fabricando los primeros prototipos de las boquillas de agua nebulizada COUNTERFOG.



Figura 38. Sistemas de detección y otras implementaciones. a) Caudalímetro y sistemas de medición y control de presión. b) Detectores de gases de la sala 2. c) Detectores de humo. d) Sistema de recogida de efluentes. e) Filtros de limpieza de salas de trabajo.

3.2 Diseños iniciales y rediseños de las boquillas

Para el sistema de boquillas COUNTERFOG, se propusieron un total de seis diseños iniciales modulares, todos ellos asistidos por aire a presión [89], pero a los que se les añadieron pequeños detalles de diseño de otro tipo de boquillas para intentar mejorar los resultados de las boquillas existentes utilizadas habitualmente. Los diseños son los siguientes y puede observarse un esquema de ellos en la Figura 39.

- Diseño A. Boquilla asistida por aire.

El principio básico de esta boquilla consiste en una interacción perpendicular del chorro de agua contra el chorro de aire en una cámara de mezclado. Posteriormente, existe una pieza con tres canales que ayuda a romper las gotas al pasar por pequeños orificios y hace que se genere un cono hueco de niebla.

- Diseño B. Boquilla asistida por aire de mezclado en cámara anular.

Como en el caso anterior, en esta boquilla el agua y el aire interaccionan en una cámara de mezclado cilíndrica, con la diferencia de que en este caso la interacción de ambos chorros no es a 45 °. Además, en este diseño varios chorros de aire (tres circuitos) chocan contra un único chorro de agua con un ángulo de 25 – 30 °. La pieza de salida de la boquilla es la misma que la del diseño A, por lo que produce un cono hueco de niebla.

- Diseño C. Boquilla asistida por aire con diseño swirl nozzle [88].

Este modelo, es una adaptación del dual – orifice swirl – nozzle. Establece un fluido primario interior (agua) y un fluido secundario exterior (en nuestro caso aire y no agua). El modelo water swirl, implementa un movimiento rotacional del agua, para que se genere una capa fina de agua con movimiento rotacional en las paredes de la boquilla. Dicha capa se hace pasar por un pequeño orificio que genera un cono fino de gotas de agua, que posteriormente interacciona con el cono de aire, en dirección inversa, que atomiza y rompe en mayor medida las gotas de agua.

- Diseño D. De nuevo se trata de una boquilla asistida por aire basada en un diseño prefilming airblast nozzle [88].

Este modelo, es uno de los más utilizados para doble fluido. Consiste en generar una película muy fina de agua sobre la que hacer incidir aire a presión. De este modo, la superficie de contacto entre agua y aire es mayor y se favorece la atomización. Es clave producir una capa de agua constante para que la niebla generada también lo sea. Este aspecto es muy importante y difícil de conseguir. La manufactura correcta de estas boquillas es compleja.

- Diseño E. Boquilla asistida por aire con diseño swirl nozzle [88].

Dentro de este tipo de boquilla swirl, estaría enmarcada como spill–return, con la modificación de la incorporación de un segundo fluido, aire, al diseño. La particularidad que presenta este diseño es que, parte del agua excedente regresa a los depósitos de los que proviene. El agua que sigue adelante se la hace rotar a través de diferentes canales adquiriendo fuerza centrífuga. Como en el caso del diseño C, se genera un cono fino hueco de gotas de agua que interacciona con otro cono de aire que termina de atomizar el agua.

- Diseño F. Boquilla asistida por aire basada en efecto twin – swirl [88].

La combinación de estos dos tipos de boquillas (twin – swirl) es muy habitual. En este caso se tomó un diseño básico de swirl nozzle axial de cono sólido. A este diseño se le implementó una segunda cámara. En esta segunda cámara, cuando al primer fluido (agua) ya se le había dotado de un movimiento rotacional, en la zona anterior del modelo swirl, se introduce un segundo fluido, aire, tangencialmente que ayuda a la atomización del agua. En este tipo de boquilla se genera un cono sólido de niebla.

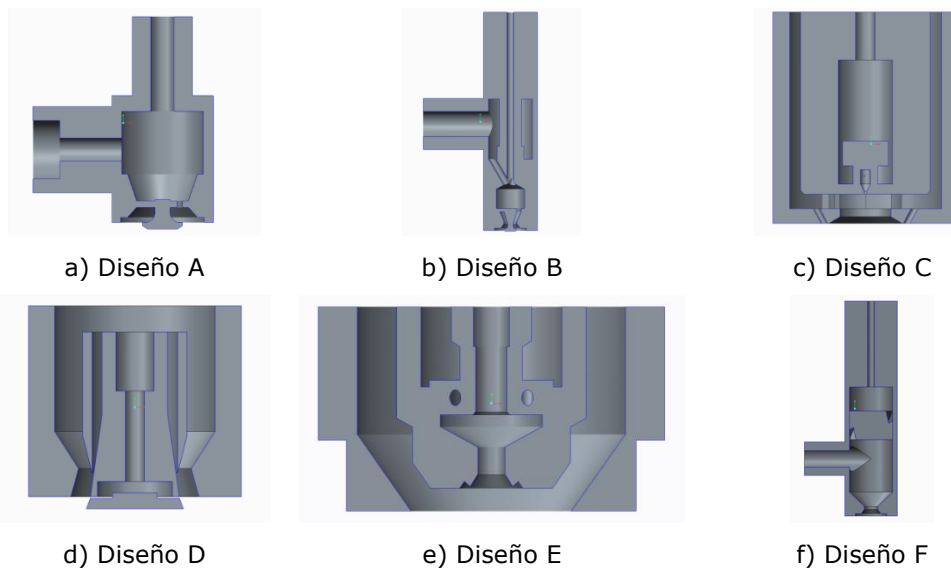


Figura 39. Modelos iniciales de boquillas propuestos en base a la bibliografía [89].

Tras diversas etapas de simulaciones, STR propuso dos modelos finales a estudiar en el presente trabajo de investigación, el diseño B y el diseño F [90]. La selección se llevó a cabo en base a los resultados de las simulaciones que realizaron con ANSYS FLUENT [92], evaluando los tamaños de gota, flujos y conos generados en base a los requerimiento iniciales del estado del arte del proyecto (parámetro indispensable tamaño de gota $1 - 1000 \mu\text{m}$, preferiblemente valores mínimos). Los modelos seleccionados son aquellos que presentan, a iguales condiciones, menores tamaños de gota y mayores velocidades de gota, parámetros críticos para la extinción de incendios.

A grandes rasgos, ambas boquillas son boquillas asistidas por aire. En la boquilla B, se produce una interacción directa de un chorro de agua con varios de aire con un ángulo concreto en una cámara de mezclado cilíndrica y dada la pieza de final que regula la salida se genera un cono hueco. Mientras que la boquilla F, introduce el concepto de movimiento rotacional interno y genera un cono sólido. Además, la forma de implementar los aditivos y/o nanopartículas previstas en el proyecto también es diferente. En el modelo B, se realiza en la cámara donde se genera la niebla a través de un único conducto, mientras que en el modelo F, las partículas son absorbidas en el exterior de la boquilla, en el propio cono de la niebla por cuatro conductos. En la siguiente Figura 40, se muestra un esquema en detalle de los diseños iniciales de los modelos seleccionados.

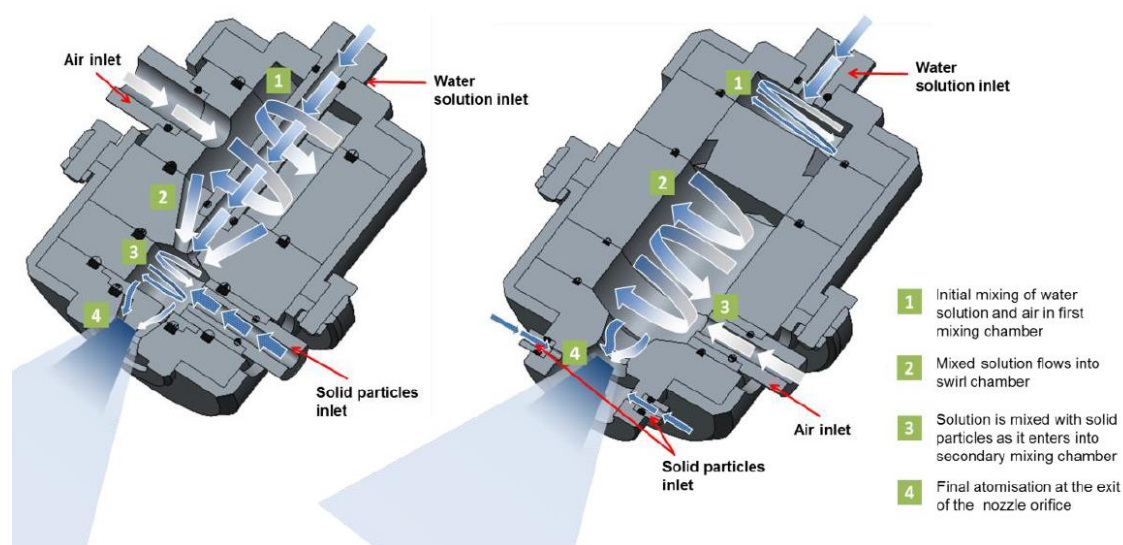


Figura 40. Modelos preliminares de boquillas generadoras de niebla. Izquierda modelo B con mezclado de tres fluidos en el interior de la boquilla. Derecha modelo F con mezclado de dos fluidos en el interior de la boquilla y nanopartículas en el exterior [90].

Una vez que el grupo de investigación de la Universidad de Stradhclyde (STR) [90] diseñó y seleccionó los dos modelos de boquillas que mejores resultados teóricos presentaban, STR se centró en el estudio de la influencia de la variación de los distintos ángulos y medidas de las piezas de las boquillas para analizar su influencia en el tamaño de gota, caudal de agua y cono de niebla de salida generado. Una vez que consiguieron optimizar todos los parámetros establecidos por el proyecto [90], se procedió a la revisión del diseño para su fabricación (ver punto 4.1).

3.2.1 Comparación teórica de las nieblas generadas por los diseños B y F

Una vez optimizados los diseños de los dos modelos de boquillas seleccionados (modelo B y F), STR realizó un estudio teórico comparativo de las características de las nieblas generadas por los distintos modelos a distintas escalas de fabricación [91]. El motivo del estudio de un posible escalado de las boquillas se comenta en el punto 4.1.2 y 4.1.3 del presente trabajo de investigación.

En Tabla VI, se muestran los caudales esperados de cada uno de los fluidos utilizados, para unas determinadas presiones de agua y aire y el diámetro SMD (Sauter Mean Diameter) de las gotas de agua generadas. Este último parámetro representa el diámetro teórico medio de una gota cuyo volumen frente a su superficie es representativo de toda la muestra. De esta Tabla VI, puede extraerse que en todas las boquillas, independientemente de la escala, para una determinada presión de aire, un aumento de la presión de agua aumenta el caudal de agua y el tamaño de partícula. Y sin embargo, para una misma presión de agua, un aumento en la presión de aire reduce el caudal de agua aumentando el caudal de aire, pero no disminuye el tamaño de gota necesariamente. Depende de las presiones que se estén considerando.

Tabla VI. Estudio teórico comparativo de parámetros clave de las nieblas de los diferentes modelos de boquilla a las diferentes escalas [90, 91].

Boquilla	P_{H_2O} / MPa	P_{air} / Pa	Q_{H_2O} / l·s ⁻¹	Q_{air} / l·s ⁻¹	SMD / μ m
B Diseño original	1	1	0.64	0.03	67
		1.5	0.35	0.06	16
		2	0.27	0.08	8
	1.5	1	1.14	0.02	158
		1.5	0.74	0.04	31
		2	0.50	0.06	49
	2	1	1.56	0.02	210
		1.5	0.84	0.04	66
		2	1.19	0.02	74
B 1:2	1	1	0.18	0.01	56
		1.5	0.10	0.02	11
		2	0.07	0.02	7
	1.5	1	0.31	0.01	158
		1.5	0.21	0.01	31
		2	0.14	0.02	49
	2	1	0.42	0.01	210
		1.5	0.33	0.01	66
		2	0.25	0.01	25
B 1:4	1	1	0.05	0.01	52
		1.5	0.02	0.01	41
		2	0.01	0.01	4.8
	1.5	1	0.08	0.01	70
		1.5	0.05	0.01	81
		2	0.04	0.01	10
	2	1	0.10	0.01	165
		1.5	0.08	0.22	114
		2	0.06	0.30	34
F Diseño original	1	1	1.38	-	20 - 70
F1:2	1	1	0.36	-	25 - 80
F1:4	1	1	0.09	-	20

Ambos modelos de boquillas a las diferentes escalas presentan tamaños de partícula dentro del rango esperado para el agua nebulizada. El siguiente paso será comprobar si estas condiciones de presión son reproducibles en la realidad y llegar a un compromiso entre presiones y consumos de agua y aire y tamaños de gota generados. En base a los resultados obtenidos, puede presagiarse que los caudales de agua de las

boquillas a escala 1:4 son insuficientes para la extinción de un incendio, mientras que los caudales de las boquillas a escala original, en determinadas combinaciones de presiones, pueden ser excesivos para los ensayos en el COUNTERFOG – Lab. La selección de la escala correcta y las presiones adecuadas se llevó a cabo en base a los ensayos realizados en el COUNTERFOG – Lab por la UAH [96].

Para comprender la interacción entre el agua y el aire dentro de la boquilla, y por tanto, la rotura de la masa de agua en finas gotas, a continuación, se muestran algunos de los resultados de las simulaciones con ANSYS FLUENT [92] para la boquilla B1:2 realizados por STR [91].

En la parte de la izquierda de la Figura 41 y Figura 42, puede verse como el agua entra en el sólido simulado por la parte central y su fracción de volumen disminuye al interactuar con el aire, que penetra por el conducto de la izquierda en la cámara de mezclado con un ángulo dado. En esta cámara interactúan los dos fluidos y el aire rompe el chorro de agua. A continuación, la forma de la salida de la boquilla favorece una nueva división en partículas y la dispersión de las mismas, abriendo el cono de la niebla generada. En la cámara donde interactúan los conductos de agua y aire, puede diferenciarse como con una presión de aire del orden de 2 MPa (Figura 41), se reduce drásticamente el caudal de agua. En cambio, a una menor presión de aire y una mayor presión de agua (Figura 42), se aprecia un mayor caudal de agua y una zona de interacción agua/aire mayor.

Por otro lado, en la imagen de la derecha de las figuras puede analizarse la distribución del tamaño de partícula. Los procesos de rotura de gota comienzan al inicio de la cámara de mezclado donde el agua y el aire interactúan por primera vez y cerca de los orificios de salida, siendo en esta zona mayor. Las presiones representadas son las más extremas, donde se muestran los máximos y mínimos caudales de agua, así como, los máximos y mínimos tamaños de gota. Se puede observar claramente en la distribución de tamaños de las gotas de agua, que a altas presiones de aire éstas son más pequeñas (azules) que las generadas a bajas presiones de aire (verdes-amarillas-rojas). Esta relación entre la presión de aire y el tamaño de partícula no siempre es clara y depende de las presiones de trabajo que se estén considerando. También se observan grandes diferencias en los conos de niebla producidos, teniendo un mayor ángulo el de la Figura 41 a mayor presión y caudal de agua. En cuanto a los histogramas de distribución del tamaño, se ve como a bajas presiones de agua y altas de aire se tiene un único rango de tamaño, mientras que en el caso inverso, la dispersión es mayor.

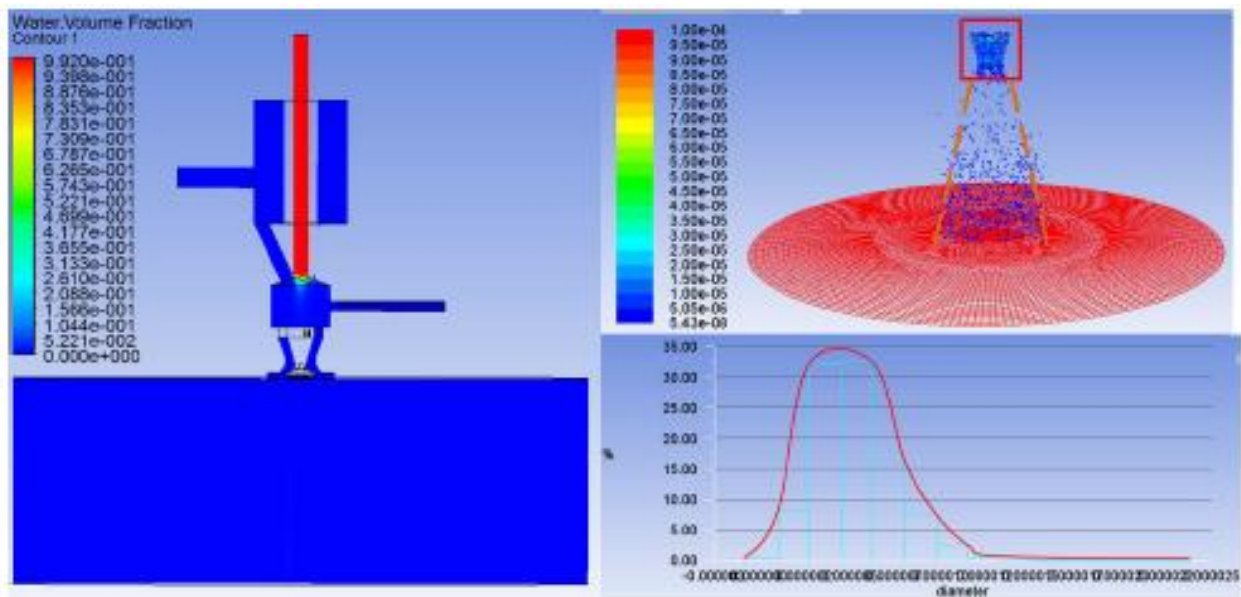


Figura 41. Simulación del comportamiento de los fluidos de la boquilla B 1:2 a 1 MPa de H₂O y 2 MPa de aire [91]. Presenta menores caudales de agua así como menores tamaño de gota y una distribución de tamaño de gota más homogénea.

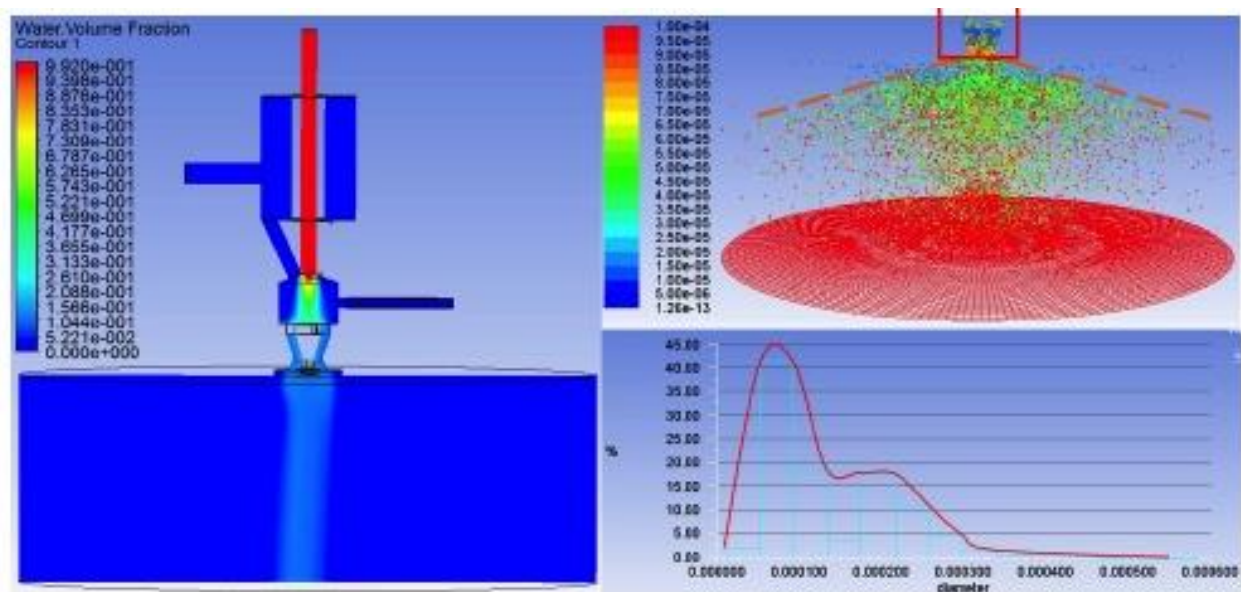


Figura 42. Simulación del comportamiento de los fluidos de la boquilla B 1:2 a 2 MPa de H₂O y 1 MPa de aire [91]. Un aumento de la presión de agua y reducción de la presión de aire aumenta el caudal de agua y el tamaño de la gota de agua generado. Además, en esta combinación de presiones existe una mayor dispersión en el tamaño de gota.

3.2.2 Otros diseños

Por otro lado, el grupo de investigación del Dr. Hornig del BPE International colaborador en el proyecto COUNTERFOG, propuso un modelo de boquilla simplificado de dos piezas en estilo bisagra fabricado con moldes que permiten la utilización de materiales cerámicos si fuese necesario (Figura 43 y Figura 44). Estos modelos se encuentran en rediseño por BPE, para la colocación de cierres que favorezcan su hermeticidad para su futuro uso.

La manufactura por colada realizada por BPE, permite fabricar la boquilla o parte de ella en materiales cerámicos como pueden ser el Ti - Al - V. Este proceso es costoso, pero podría ser útil para la fabricación del diseño final y poder relacionar funcionalidad con costes de fabricación y durabilidad. En función de la aplicación y de la vida útil de la boquilla requerida se puede evaluar un amplio espectro de materiales, tomando como punto de partida aceros y aleaciones ligeras, se puede evolucionar hasta cerámicos, composites o materiales desechables, así como otros meramente decorativos.

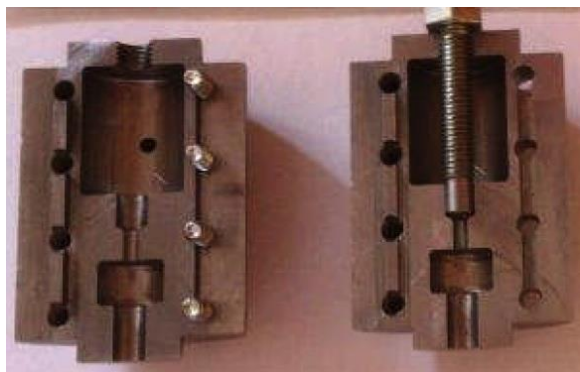


Figura 43. Modelo rediseñado por BPE.



Figura 44. Imagen de la boquilla de BPE instalada en el Laboratorio COUNTERFOG.

3.3 Materiales base para la realización de las boquillas

De acuerdo con la bibliografía consultada, y los cálculos y simulaciones realizadas (ver punto 4.2), el estudio de los posibles materiales se centró en el Al y sus aleaciones, en concreto la serie 6xxx y 7xxx, y sus posibles tratamientos de endurecimiento. Para la selección de la aleación se tuvieron en cuenta los requerimientos mecánicos en función del uso y condiciones de funcionamiento. También se realizó un detallado estudio de tensiones para todas las piezas fabricadas con los materiales candidatos (ver punto 4.4).

3.3.1 Aleaciones de aluminio

3.3.1.1 AA 6XXX

Las AA (Aleaciones de Aluminio) de la serie 6000, se caracterizan por tener como principales elementos de aleación el Mg y Si, cuya combinación forma el compuesto intermetálico Mg_2Si , que junto a otros compuestos complejos del tipo FeCrAlSi endurecen fuertemente el material. La aleación más ampliamente utilizada de esta serie es la AA 6061, que presenta contenidos entre 0.8 - 1.2 % de Mg, 0.4 - 0.8 % de Si, 0.15 - 0.40 % de Cu, 0.04 - 0.35 % de Cr. La presencia de precipitados en estas aleaciones modifica sus propiedades mecánicas, más concretamente, la AA 6082 - T6 alcanza valores de resistencia mecánica de 290 MPa, lo que justifica su utilización en

piezas para su aplicación en fines estructurales de carácter general [97]. En la Tabla VII, se muestran las principales características y aplicaciones de esta serie.

Tabla VII. Características y aplicaciones de la serie AA 6xxx.

Composición	Al, Mg y Si (Mg_2Si).
Características	Tratables térmicamente por precipitación. Propiedades mecánicas inferiores que en series AA 2XXX y AA 7XXX. Propiedades mecánicas mejorables con adiciones de Cu y Si. Buen conformado, soldabilidad y maquinabilidad. Buena resistencia a la corrosión.
Usos	Decoración. Mobiliario. Estructuras. Calderería soldada. Carrocerías. Construcción ferroviaria y naval. Aplicaciones deportivas.

3.3.1.2 AA 7XXX

Las AA 7000 añaden al componente mayoritario Al contenidos variables de Zn, Mg y Cu, que al combinarse entre sí forman compuestos intermetálicos del tipo $MgZn_2$, principal intermetálico endurecedor en esta serie de aleaciones. La elevada concentración del Zn y Mg en la matriz de Al produce, con el tratamiento térmico adecuado, una densidad de precipitados elevada, y por lo tanto, un mayor endurecimiento. La serie AA 7000 son las aleaciones de Al que presentan una mayor capacidad de endurecimiento.

La aleación más empleada en la industria de esta serie es la AA 7075, con una composición aproximada de 5.1 - 6.1 % Zn, 2.1 - 2.9 % Mg, 1.2 - 2.0 % Cu y 0.18 - 0.28 % Cr y que con un tratamiento T6 alcanza resistencias a la tracción superior a 500 MPa. Una de las características más relevantes de esta aleación es la elevada resistencia mecánica que se alcanza mediante envejecimiento natural. Hecho que les hace ser de gran utilidad en aplicaciones industriales (por ejemplo, material estructural) donde se requieren materiales con resistencia específica elevada y bajo coste, como en aplicaciones para vehículos y en la industria aeronáutica [98]. En la Tabla VIII, se muestran las principales características y aplicaciones de esta serie.

Tabla VIII. Características y aplicaciones de la serie AA 7XXX.

Composición	Al, 1 - 8 % Zn.
Características	Tratables térmicamente por precipitación si se añade Mg. Bajo contenido en Cu (≤ 0.2 %): soldables y resistentes a corrosión si no están soldadas (AA 7020). Alto contenido en Cu (1.2 - 2 %): el estado T6 (465 °C seguido de temple en agua a 40 °C y maduración artificial durante 12 - 16 h a 135 °C) confiere una elevada resistencia mecánica a estas aleaciones. Su resistencia a agentes atmosféricos es pequeña y son soldables sólo por técnicas especiales (AA 7075).
Usos	Bajo contenido en Cu: blindaje, transporte, mecánica y artículos deportivos. Alto contenido en Cu: fabricación de moldes, industria aeroespacial y armamento.

Las propiedades excepcionales de las AA 7XXX están determinadas fundamentalmente por las partículas precipitadas de los elementos en solución sólida, la estructura de grano y las dislocaciones. Estas aleaciones contienen tres tipos de partículas [99]:

- Partículas constituyentes: su intervalo de tamaño es amplio (1 – 30 μm) y se forman a partir del Fe y el Si presentes en la aleación como impurezas. Son resistentes a la disolución, presentan morfología irregular y perjudicial para la mayoría de las propiedades mecánicas de la aleación. Entre ellas, se pueden encontrar las siguientes fases: $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, $(\text{Al,Cu})_6(\text{Fe,Cu})$, Mg_2Si , $\alpha\text{-Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$, $\text{SiO}_2(\text{a})$, Al_6Fe y $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$.
- Dispersoides: su tamaño se encuentra en torno a 0.5 μm y se forma durante la solidificación de la aleación o durante el tratamiento térmico de la misma. En general, son solubles sólo en el líquido. Por su distribución y fracción en volumen juegan un papel esencial en la fijación de las fronteras. Entre ellas destacan las fases de $\text{Al}_{12}\text{Mg}_2\text{Cr}$ y $\text{Al}_{18}\text{Mg}_3\text{Cr}_2$.
- Precipitados endurecedores: presentan un tamaño por debajo de 0.1 μm y se forman por descomposición de una solución sólida sobresaturada durante un tratamiento de envejecimiento. Son los responsables de la resistencia elevada de estas aleaciones. En las aleaciones con relaciones Zn:Mg entre 1:2 y 1:3, como la AA 7075, se forman precipitados MgZn_2 (fase η) cuando la temperatura de envejecimiento es inferior a 200 °C y la fase $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ (fase T) a mayores temperaturas. Además, la fase CuMgAl_2 también precipita en aquellas aleaciones con más de 1 % Cu, como la AA 7075.

3.4 Mecanizado de las boquillas

Como en todo trabajo de mecanizado, la fabricación del primer prototipo es la más laboriosa, debido a las rectificaciones sobre plano que se llevaron a cabo para hacer fabricables los primeros diseños. Esto se explica exhaustivamente en el punto 4.1. Las boquillas a escala 1:1 y 1:2, fueron fabricadas en el taller general de la Departamento de Tecnología del CIEMAT, mientras que las de escala 1:3 se mecanizaron en una empresa externa, al objeto de constatar si otro taller industrial no acostumbrado a la realización de prototipos de investigación era capaz de realizar las piezas a partir de los planos finales realizados.

Para la fabricación de las boquillas en el taller del CIEMAT se utilizó principalmente un torno paralelo, un torno automático CNC (Control Numérico Computarizado) de alta precisión (Heller TMZ Figura 45) y una fresa CM Chevalier de precisión. Para la realización de estas boquillas se utilizaron los materiales caracterizados en el punto 4.3, en concreto la AA 6082 – T6 para el primer prototipo de cada modelo a escala 1:1 y la AA 7075 – T6, para el resto de boquillas fabricadas.

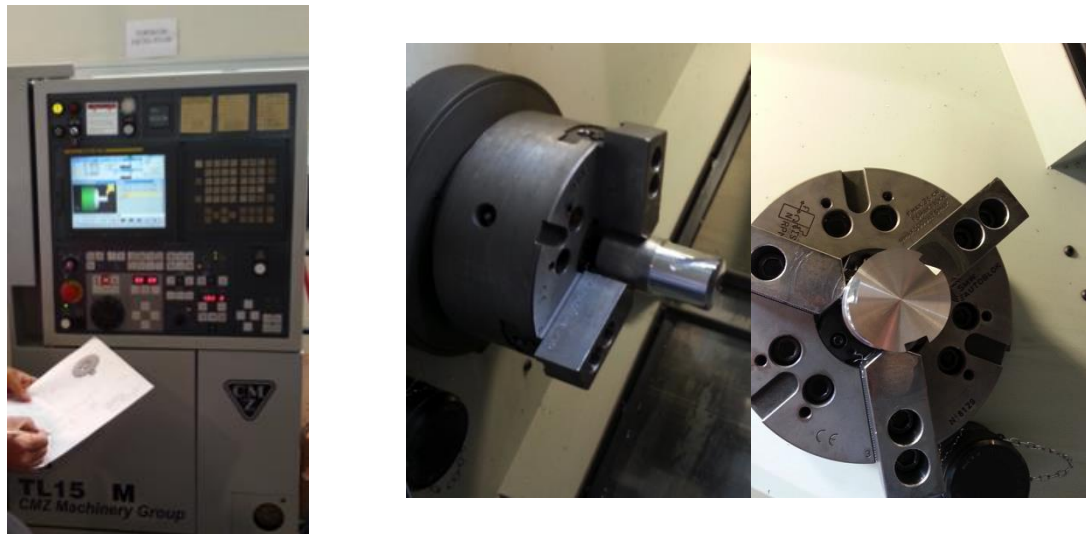


Figura 45. Torno de CNC del taller del CIEMAT.

Para la fabricación de las boquillas escaladas a 1:3, se ha utilizado la AA 7075 – T6 proporcionada por Alumafel, con unos valores composicionales según norma EN 573-3 [100] y valores de resistencia mínimos garantizados según normativa EN 755-2 [101]. La empresa encargada de realizarlas fue RAMEN S.A.. Se han utilizado centros de mecanizado Makino PS95 y DMG DMU 50.

Por último, la fabricación de 10 boquillas en serie del prototipo final para ensayos a escala real se llevó a cabo a través de la empresa APM (Alta Precisión de Mecanizado) (Figura 46). El material fue proporcionado por SABATER FUNDIMOL S.L. con unos valores composicionales según norma EN 573-3 [100] y valores de resistencia según normativa EN 755-2 [101].

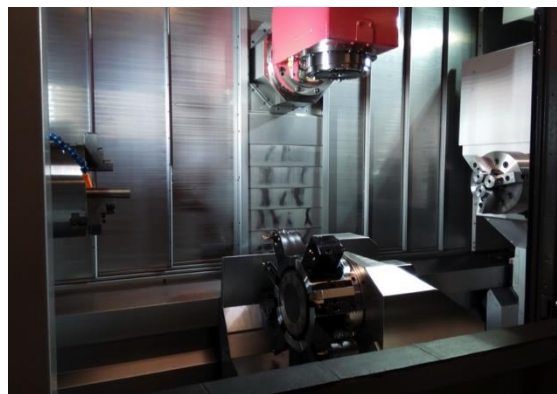


Figura 46. Centro de CNC de la empresa APM.

Para la fabricación de todas las boquillas se han elegido centros de CNC ya que permite automatizar múltiples operaciones de precisión sin la intervención humana. El CNC es capaz de cambiar automáticamente de herramientas y cambiar la posición de la pieza, pudiéndose mecanizar en todas las direcciones. Además, los CNC permiten verificar dimensiones clave después del mecanizado, controlar la vida útil de la herramienta y el cambio automático de herramientas cuando se desgastan [102]. Estas máquinas de CNC permiten combinar torno y fresa, reduciendo los tiempos de

fabricación y ajuste de la pieza. Todas las piezas diseñadas pueden realizarse fundamentalmente con torno y fresa, evitando otras técnicas como electroerosión o extrusión que pueden alterar la superficie del material y por tanto su resistencia.

3.4.1 Tolerancias

Una vez establecidas las medidas nominales, en base a los sólidos simulados en la fase de diseño, se determinaron sus tolerancias correspondientes. La posición de las mismas fue H y h, en función de si se trataba de un diámetro interior o exterior, respectivamente. En cuanto a la calidad y magnitud de la tolerancia se establecieron entre 6 y 7. Las tolerancias se establecieron en base a la normativa UNE-EN ISO 286-1:2011 [103, 104].

Tras el uso de las primeras boquillas, se pudo comprobar que en los espacios mínimos disponibles dejados por estas tolerancias se acumula suciedad, cal, productos de corrosión, etc., lo que dificulta el montaje y desmontaje para la comprobación del correcto funcionamiento de la boquilla. Por esta razón, algunas de las tolerancias se reajustaron en taller a la hora de fabricar las nuevas boquillas, como son la tirada de 10 boquillas en serie para ensayos a escala real. La finalidad de este cambio fue favorecer el montaje y desmontaje de la boquilla para las comprobaciones visuales rutinarias del interior una vez que ya se hayan comenzado a utilizar para controlar posibles obstrucciones y corrosión.

De todas las piezas fabricadas, se realizaron controles dimensionales con medidores tridimensionales para comprobar que las boquillas fabricadas se ajustaban a las tolerancias solicitadas y para evaluar el posible desgaste y deformación de las boquillas al final de su vida útil.

3.4.2 Despiece de las boquillas fabricadas

En este apartado, se van a mostrar todas las boquillas fabricadas en el proyecto COUNTERFOG para los dos modelos seleccionados y a las diferentes escalas. Una vez caracterizadas las nieblas generadas por los distintos tipos de boquillas, se realizaron algunas pruebas preliminares que veremos en puntos sucesivos de los resultados del presente trabajo de investigación. En base a ellos, se estudiará la viabilidad del empleo de las diferentes boquillas y se seleccionará una en concreto para la batería de ensayos a realizar con los compuestos NR, que son objeto de estudio del presente trabajo de investigación.

3.4.2.1 Despiece de las boquillas a escala 1:1

A continuación, se muestran los primeros prototipos diseñados y fabricados a tamaño original de sendos modelos de boquilla B y F (Figura 47 y Figura 48, respectivamente). Estos primeros modelos fueron realizados en AA 6082 – T6. En base al estudio de materiales realizado, se fabricaron en una aleación disponible en el taller, para poder testar la viabilidad de la producción de los modelos teóricos y comprobar

mecánicamente su funcionalidad. Esta aleación garantiza las primeras pruebas a escala real a T_{amb} . Esta escala de modelo de boquillas está previsto utilizarlo en ensayos a escala real en exteriores debido al cono de niebla generado por las mismas que veremos más adelante.

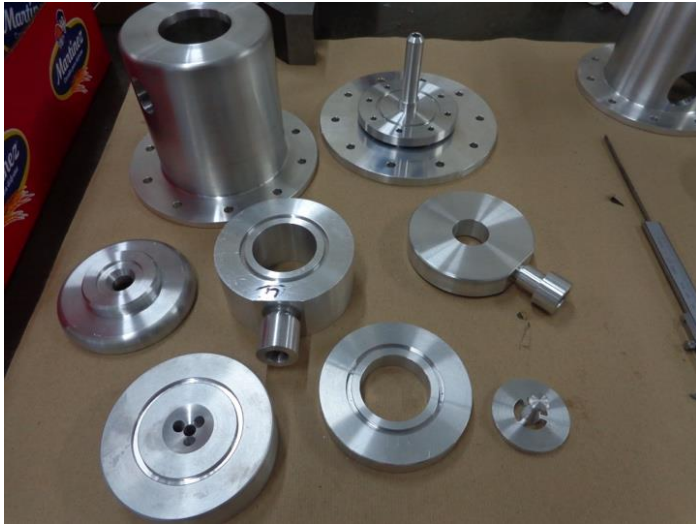


Figura 47. Componentes de la boquilla B a tamaño original, escala 1:1.

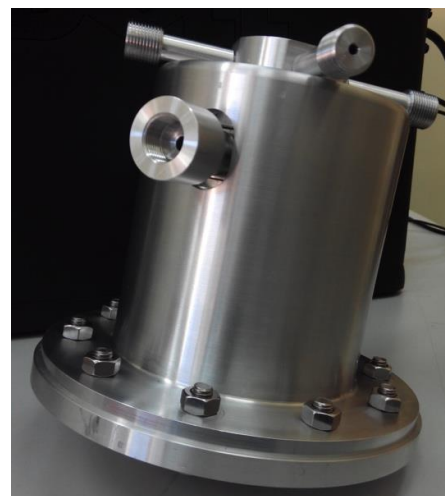


Figura 48. Componentes de la boquilla F a tamaño original, escala 1:1.

Una vez realizadas las primeras pruebas y comprobada la viabilidad de la boquilla y de la fabricación, se procedió al mecanizado de las boquillas escaladas en AA 7075 – T6, previendo su utilización en espacios cerrados, atmósferas adversas y a temperaturas superiores.

3.4.2.2 Despiece de las boquillas a escala 1:2

En base al conocimiento adquirido durante la fabricación, montaje y pruebas del primer prototipo, se realizaron diversos ajustes, que dieron lugar a la fabricación de los

siguientes conjuntos de boquillas escaladas en AA 7075 – T6 para garantizar la mejora de las propiedades mecánicas requeridas.

En este punto del presente trabajo de investigación, se muestra el despiece de las boquillas a escala 1:2. Modelo B 1:2 (Figura 49) y modelo F 1:2 (Figura 50). Se fabricaron dos boquillas de cada modelo, una para la caracterización de la niebla por parte de la UAH y su empleo en los ensayos de descontaminación NRBQ, y otra para la realización de un estudio de la vida útil de la boquilla, trabajando en continuo un elevado número de horas (este ensayo actualmente sigue en operación).

Esta escala de boquilla presenta un tamaño adecuado tanto para su instalación en el COUNTERFOG – Lab, como para su disposición en serie en los futuros ensayos a escala real tanto en interiores como en exteriores.



Figura 49. Despiece de la boquilla B 1:2.



Figura 50. Despiece de la boquilla F 1:2.

3.4.2.3 Despiece de las boquillas a escala 1:3

Y por último, en las siguientes figuras (Figura 51 y Figura 52) se muestran las boquillas escaladas a 1:3 de ambos modelos. Como en el caso anterior, se fabricaron dos boquillas de cada uno de los modelos para futuros ensayos en AA 7075 – T6.

Este tamaño de boquilla se pretende destinar a su instalación en serie en edificios. La selección entre la boquilla a escala 1:2 o escala 1:3 se realizará fundamentalmente en función del espacio a cubrir por las mismas.



Figura 51. Componentes de la boquilla B 1:3.



Figura 52. Componentes de la boquilla F 1:3.

En las Figura 53 y Figura 54, se muestra una comparativa de tamaños de todas las boquillas fabricadas.



Figura 53. Boquilla B escala 1:3 y escala 1:2.



Figura 54. Boquilla F escala 1:3, escala 1:2 y escala 1:1, respectivamente.

3.5 Simuladores de agentes NRBQ seleccionados

Los sustitutos NRBQ que se pueden emplear están supeditados a las condiciones de seguridad exigidas por PRL y PR (Protección Radiológica). Por este motivo, se realizó una evaluación de riesgos en el COUNTERFOG - Lab [94] en base a la normativa aplicable. En primer lugar, se realizó una identificación de riesgos generales de la instalación, y en segundo lugar, otra de los riesgos que van a suponer los trabajos que se pretenden realizar en el proyecto COUNTERFOG. Para la identificación de riesgos generales se aplicó el RD 486-1997 [105], por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo, y para la valoración de daños asociados se realizaron tablas de evaluación de la probabilidad de daño, ocurrencia y severidad del daño que pudiera ocurrir en base a este mismo RD [105]. Gracias a estas evaluaciones y a las fichas de seguridad de los agentes a utilizar, se pudo realizar una adecuada y segura selección de los simuladores NRBQ. En el COUNTERFOG - Lab todos los riesgos han sido clasificados como moderados y tolerables, en ningún caso se han encontrados riesgos intolerables [94].

Dado que el presente trabajo de investigación va a centrarse en el estudio de los sistemas de respuesta diseñados frente a partículas sólidas dispersas de carácter NR (efecto bomba sucia u otro tipo de RDD), se revaluaron los candidatos propuestos en la introducción en base a los requisitos impuestos por PRL y PR. Para hacer posible esa evaluación favorable de los riesgos del laboratorio, fue necesario posponer los ensayos con I_2 y KI. Entre las razones, se destacan que el I_2 sublima a bajas temperaturas, por lo que estará presente en forma de gas y el laboratorio no está capacitado para ello, así como para detectarlo. Este radionucléido se investigará en etapas posteriores de evaporación de químicos para simular agentes como pueden ser el gas mostaza o el gas sarín. En este punto, será necesario implementar nuevas contramedidas como son la adición de nanopartículas de óxidos metálicos para favorecer la adsorción del gas, así como nuevos métodos de detección. Además, el I_2 puede ocasionar reacciones adversas en los metales que componen el laboratorio. En el caso del KI, a toda la problemática anteriormente mencionada, se suma que se espera de él un comportamiento e interacción con la niebla muy parecido al que pueda tener el CsCl, compuesto menos problemático a la hora de ser dispersado en el COUNTERFOG - Lab.

La contramedida diseñada está basada en la acción del agua y su capacidad de interacción con el agente evaluado. Por ello, a la relación de sustitutos iniciales se añadieron tres compuestos de empleo común de diferente solubilidad. Estos agentes fueron el $NaHCO_3$, comúnmente conocido como bicarbonato, el NaCl (sal común) y el $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ (talco). Su diferente comportamiento frente al agua (compuestos hidrofílicos e hidrofóbico, respectivamente) ayuda a poner de manifiesto la influencia del tamaño de gota de agua generada y la tensión superficial de las gotas de agua a la hora de disolver y/o arrastrar el material dispersado. Por lo tanto, los sustitutos a estudiar son los siguientes:

- Talco - $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$,
- $NaHCO_3$,

- NaCl,
- CsCl,
- Urea – $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y
- KH_2PO_4 .

Los agentes seleccionados, así como los agentes NR reales, presentan diferente solubilidad en agua, y por ello, es necesario estudiar la posibilidad de modificar la tensión superficial del agua para facilitar el arrastre de las partículas de baja solubilidad o insolubles. A continuación, se muestran los compuestos sustitutivos seleccionados en orden decreciente de solubilidad³:

- CsCl – $1000 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a 20°C . Soluble. Higroscópico.
- $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ - $480 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a 20°C . Elevada solubilidad en agua.
- NaCl – $359 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a 20°C . Soluble.
- KH_2PO_4 – $208 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a 20°C . Higroscópico.
- NaHCO_3 - $103 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a 20°C .
- $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Insoluble en agua.

3.5.1 Dispersión de los radionucléidos

A la hora de dispersar los simuladores de los agentes NR seleccionados, se quiere emular la dispersión de aerosoles generados por la detonación de un dispositivo RDD. Al objeto de encontrar el mejor procedimiento de dispersión de aerosoles, se ensayaron principalmente los dos sistemas de dispersión que se describen a continuación:

3.5.1.1 Pistola aerográfica de gravedad

La selección del método óptimo se basó en la repetitividad del método de dispersión de aerosoles. En la Figura 55, se muestra la pistola de gravedad en operación. Este sistema tiene la ventaja de poder controlar el caudal y la presión de aire así como el cono de apertura para la dispersión del polvo. Entre los principales problemas detectados destacan que es necesario activarla manualmente para evitar obstrucciones, lo cual pone en riesgo la hermeticidad del ensayo y expone a quien la maneja a nanopartículas de diferentes materiales. Asimismo, la dispersión del producto es unidireccional, de modo que la distribución del agente en la sala no es comparable a la producida por un artefacto RDD.

³ La información de la solubilidad de los compuestos fue extraída de la ficha de seguridad de los compuestos químicos.



Figura 55. Pistola de gravedad cargada de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ y con 0.2 MPa de presión de aire.

3.5.1.2 Explosión de globos cargados con el agente a dispersar

Ante los problemas que presentaba la técnica de dispersión anteriormente comentada, se optó por la explosión de globos cargados con el simulador seleccionado con ayuda de aire a 0.2 MPa de presión (ver Figura 56). El dispositivo se ubicó en mitad de la sala de experimentación (ver Figura 57) para evitar que, tras la explosión, el polvo dispersado impactase directamente contra las paredes y se adhiriese a ellas (ver Figura 58). Se ensayaron globos de diversos tamaños y con distintas cantidades de producto en su interior para comparar su influencia en el efecto dispersivo. En cuanto a las cantidades de producto utilizadas, se probaron desde 1 g hasta 5 g. Se observó que por encima de 2 g el excedente caía directamente en el suelo, por lo que se determinó como cantidad óptima 2 g de producto.



a)



b)

Figura 56. Disposición de los primeros globos grandes en la estructura de soporte de las boquillas. a) Momento inicial de colocación del dispositivo de explosión. b) Momento previo a la explosión del dispositivo de dispersión.

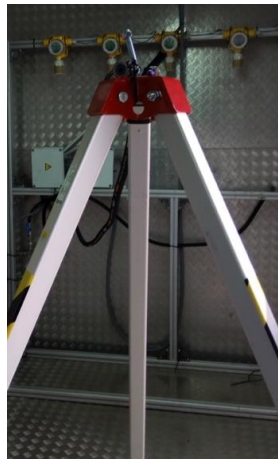


Figura 57. Sistema de explosión definitivo seleccionado, centrado en la sala para favorecer una explosión tridimensional y un reparto homogéneo del producto en la sala.



a)



b)

Figura 58. Imagen de explosiones fallidas unidireccionales del globo cargado con el producto a dispersar. a) Explosión hacia atrás contra las paredes del laboratorio. b) Caída directa al suelo del material a dispersar.

3.6 Selección de aditivos

El agua nebulizada por sí sola, puede llevar a la deposición y/o descontaminación de la mayoría de los agentes NRBQ. Pero existe un problema con aquellos aerosoles no polares y es que la niebla por sí sola no los consigue disolver y arrastrar, así como con aquellos agentes que se presenten en forma de gas. Es por ello, que en base a la bibliografía consultada y teniendo en cuenta las soluciones utilizadas en la descontaminación de diferentes escenarios de emergencia comentados en el punto 2.1.4 del presente trabajo de investigación, se propusieron diversos aditivos a utilizar.

Con los aditivos se pretende favorecer la interacción de las gotas de agua con los compuestos hidrofóbicos. Se han elegido tensoactivos para disminuir la tensión superficial de la gota y que esta sea más flexible y se favorezca la interacción. En base a lo comentado en el punto 2.1.3 de la introducción, para la descontaminación de superficies y personas en la mayoría de los casos suele utilizarse agua jabonosa (tensoactivo aniónico) y otros desinfectantes. Como uno de los requisitos del proyecto COUNTERFOG es garantizar la inocuidad del sistema de respuesta, se ha propuesto el uso de jabones a bajas concentraciones (fijadas por la UAH [106]). Este tipo de tensoactivos producen espumas, que dadas las características del sistema y las presiones de trabajo podrían causar problemas, por lo que se buscaron otras posibles soluciones que no presentasen este problema. Las soluciones comerciales utilizadas para descontaminar en este tipo de escenarios (DS2, aminas, lejías, cloro...) no pueden utilizarse directamente ya que tenemos que garantizar que sean inocuos y que solubilizan compuestos apolares. Por ello, se propuso la utilización de isopropanol o también denominado alcohol isopropílico.

El isopropanol es un antiséptico utilizado para desinfectar heridas, tatuajes, etc, y para limpiar superficies, especialmente para disolver aceites. Además, el isopropanol va a ser capaz de interaccionar con superficies hidrofóbicas [107]. El grupo metilo se adsorbe en la superficie hidrofóbica y el grupo hidroxilo queda libre hacia la fase líquida. La mayoría de las moléculas de agua son repelidas de la superficie hidrofóbica, pero sin embargo sí interaccionan con los grupos hidroxilos libres. Y por otro lado, si la superficie es hidrofílica, las moléculas de agua son arrastradas hacia la superficie y las moléculas de isopropanol se invierten (ver Figura 59). Esto significa que la mejora de la solución para la interacción con partículas hidrofóbicas no pone en peligro la interacción con un compuesto hidrofílico.

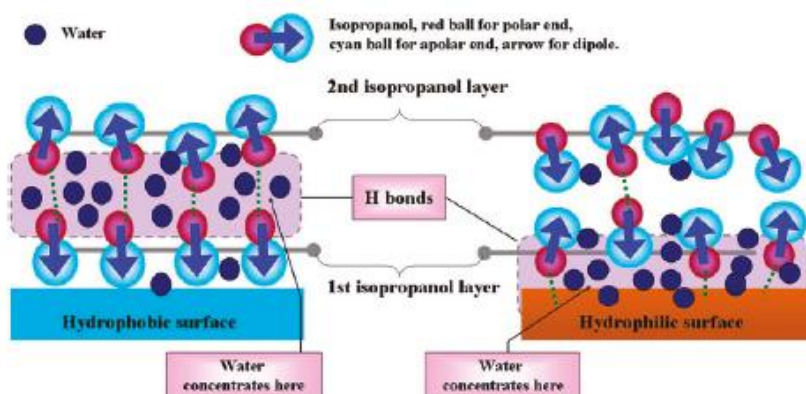


Figura 59. Interacción de una solución acuosa de alcohol isopropílico con superficies de distinta polaridad, hidrofóbicas e hidrofílicas [107].

Para comprobar la fuerza de arrastre del agua con respecto al compuesto más insoluble, $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, se realizaron diferentes ensayos añadiendo al agua distintas cantidades de tensoactivos. Los surfactantes que se probaron fueron los siguientes:

- Bio - Sel (líquido limpiador industrial, clínico, analítico y radiológico, J.P. Selecta S.A.),
- MucosolTM (agente limpiador universal para instrumentos y Labware, Merz GmbH & Co),
- detergente industrial y
- alcohol isopropílico.

El comportamiento del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ en presencia de los surfactantes antes mencionados fue evaluado en la Figura 60. En estos ensayos se observó cómo al añadir $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ al agua o al agua con Mucosol o detergente industrial este se quedaba en la superficie, no interaccionaba. Sin embargo, al añadir $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ al agua con isopropanol o con Bio - Sel, el $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ si interaccionaba con el agua. Es por ello, que se eligieron estos dos aditivos para utilizar en los ensayos.



Figura 60. Imagen de los ensayos de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ en agua en presencia de los diferentes aditivos.

3.7 Técnicas de caracterización

A continuación, se describen cada una de las técnicas de caracterización utilizadas en este trabajo de investigación. El nivel de detalle de cada una de ellas va en función de la novedad de la técnica y de la relevancia en la investigación.

3.7.1 Propiedades mecánicas de las aleaciones

Al objeto de poder asegurar el comportamiento mecánico de las boquillas en operación, se realizaron una serie de probetas de las aleaciones utilizadas para la fabricación de los prototipos, según indica la norma ASTM (American Society of Testing Materials) [108], para la determinación de las propiedades mecánicas del material base y para estudiar la influencia de la temperatura en ellas.

Para la determinación de las propiedades mecánicas de las aleaciones se utilizó una máquina de ensayos universal de la firma Instron (modelo MTS 810 de 10 kN de capacidad), que permite realizar ensayos a temperaturas controladas siguiendo la normativa ASTM para ensayos de tracción [108]. La deformación durante los ensayos se ha medido con un extensómetro axial MTS modelo 634.12-F1 de 25 mm de longitud calibrada y un rango de medida de -2.5 mm a $+12.5\text{ mm}$, siendo la máxima deformación medida del 50 %. La velocidad de ensayo inicial hasta el 1 % de la deformación es de 10^{-3} min^{-1} . A partir de este punto el control de los ensayos se realiza por desplazamiento y la velocidad cambia a $0.25\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, tal y como recomienda la norma de ensayo.

En estos ensayos, se aplicó una velocidad de deformación constante a una probeta normalizada hasta la rotura. Las probetas normalizadas utilizadas se mecanizaron siguiendo las especificaciones de la normativa ASTM [108], tanto longitudinal, como transversalmente respecto a la barra origen de material. Estas probetas utilizadas son de tipo cilíndrico, con una longitud calibrada de 25 mm y una sección de diámetro 6.26 mm. Asimismo, se realizaron controles dimensionales de las probetas antes de ensayar que pueden ser consultados en el punto 4.3.

Con el fin de poder medir la variación de las propiedades mecánicas en el intervalo de trabajo previsto para las boquillas generadoras de niebla, se realizaron ensayos mecánicos a temperaturas controladas de 25 °C (T_{amb}) y 150 °C (T de emergencia). Este último valor de temperatura, se seleccionó considerando un escenario de emergencia en el que esté presente fuego. Esto permitirá evaluar el comportamiento mecánico de la boquilla en escenarios de emergencia, es decir, si es capaz de trabajar a dichas temperaturas.

Los parámetros de interés obtenidos a partir del ensayo universal de tracción son:

- **Limite elástico al 0.2 %, $\sigma_{p0.2}$.** Se determina a partir del diagrama de tensión - deformación dibujando una línea paralela a la parte recta de la curva y a una distancia de esta equivalente en porcentaje del 0.2 % de

deformación. El punto en el que esta línea intersecta la curva es el valor del límite elástico.

- **La resistencia a la tracción, σ_m .** Se determina como la máxima carga soportada por la probeta durante el ensayo dividida por la sección inicial de la probeta.
- **Alargamiento unitario, ϵ_u .** Es la deformación correspondiente al valor de la resistencia.
- **Alargamiento total, ϵ_T .** La deformación calibrada se determina con la relación siguiente <1>:

$$\epsilon_T = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad <1>$$

Donde L es la longitud entre marcas medidas en la probeta rota y L_0 es la longitud entre marcas antes del ensayo.

- **Estricción, Z.** Se determina con la relación siguiente <2>:

$$Z = \frac{A_0 - A}{A_0} \cdot 100 \quad <2>$$

Donde A es el valor del área transversal medida en la probeta rota y A_0 es el valor del área transversal antes del ensayo.

3.7.2 Caracterización metalográfica

Mediante el MO (Microscopio Óptico) Olympus Vanox – T AH – 2, se analizó el material de origen, para estudiar su tamaño de grano y su direccionalidad. Asimismo, se estudiaron diferentes superficies de piezas clave después de su uso para analizar las posibles variaciones estructurales de las boquillas en operación.

A través de SEM (Scanning Electron Microscope), se estudió la fractografía de las probetas ensayadas mecánicamente. Con ello, se pretende observar las diferencias en función del tipo material, la direccionalidad y la temperatura. El instrumento utilizado fue el SEM Hitachi FE SU 6600.

3.7.3 Medida de durezas

Para poder valorar el cambio de dureza del material tras el uso, se realizaron medidas de dureza Vickers, tanto en el material de partida, como en las boquillas tras la batería de ensayos realizados. Estas medidas se realizaron con un durómetro AKASHI AVK-AII.

3.7.4 Distribución de tamaño de partícula

Los simuladores de los contaminantes NR, utilizados en los ensayos, se caracterizaron para poder medir la distribución de tamaños de partícula y así poder evaluar su comportamiento en los experimentos. Para ello se empleó el equipo Malvern Instruments modelo serie 2600. Para la determinación de la distribución de tamaños de partícula de cada una de las muestras, estas se muestrearon con diferentes solventes: agua desionizada, pirofosfato, etanol y ciclohexano, pero ninguna de estas soluciones permitió medir adecuadamente los tamaños de partícula de los simuladores. Por ello, se probó con alcohol isopropílico, que permitió satisfactoriamente mantener en suspensión y de manera relativamente estable todos los materiales que son objeto de este estudio.

En función de cada una de las distribuciones de tamaño de partícula de cada uno de los materiales, se optimizó la configuración del equipo, de tal manera que en función de las muestras se emplearon lentes diferentes:

- Lente de 300 mm para el NaHCO_3 , KH_2PO_4 , CsCl , NaCl y $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$.
- Lente de 100 mm para el $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.

La lente de 300 mm es capaz de ver partículas en un intervalo de entre 5.8 – 564 μm y la de 100 mm entre 0.9 – 188 μm . En cada uno de los análisis de distribución de tamaño de partícula se realizan 5000 medidas de partícula de la muestra sometida a estudio. Al objeto de asegurar la repetitividad de las medidas realizadas cada una de las muestras se repitieron al menos 5 veces.

3.7.5 Detección óptica de partículas suspendidas en la atmósfera

La utilización de métodos ópticos permite obtener información sobre la distribución de tamaños y la evolución del material particulado dispersado en la atmósfera del laboratorio durante los ensayos. El procedimiento empleado se basa en aprovechar la dispersión de la luz provocada por las partículas en suspensión, fenómeno conocido como efecto Tyndall y, gracias al cual, dicho material particulado es visible al ojo humano. Estos sistemas, son capaces de proporcionarnos información sobre la distribución de los aerosoles generados en la atmósfera y su concentración (número de partículas por unidad de tiempo). Esto nos va a ayudar a determinar la efectividad de la niebla generada como sistema de limpieza de atmósferas contaminadas. Los datos obtenidos, además, nos permiten monitorizar la evolución espacial de la pluma del simulador seleccionado y determinar parámetros como son el TOF (Time of Flight) del material pulverulento dispersado en la sala y el tiempo requerido para su limpieza.

Para poder observar el proceso se instaló un circuito cerrado de televisión en el laboratorio (CCTV, Close Circuit TeleVision). Las técnicas ópticas empleadas para monitorizar la evolución de la pluma de contaminante, la niebla y el proceso de limpieza de la sala son las siguientes.

- Técnicas ópticas cualitativas:
 - CCTV combinado con luz natural. (Figura 61).

- CCTV combinado con un láser. (Figura 62).
 - CCTV combinado con una linterna LED. (Figura 63).
- Técnicas ópticas cuantitativas:
 - CCTV acoplado con un detector de partículas. (Figura 64).

3.7.5.1 Técnicas ópticas cualitativas

3.7.5.1.1 CCTV + luz natural

Gracias al sistema CCTV y al diseño y orientación del laboratorio, pudo observarse en presencia de la luz natural incidente, las partículas NR dispersadas en los ensayos. En la Figura 61, puede observarse la explosión que simula a un RDD. Esta técnica presenta las limitaciones de la necesidad de una luz natural constante, por lo que se plantearon otras alternativas que se comentan a continuación.

3.7.5.1.2 CCTV + láser

Se acopló un láser al sistema de CCTV y se enfocó la cámara para la detección de cualquier dispersión producida en el láser por la presencia de las partículas en la atmósfera (Figura 62). Permite la detección de material particulado a altas concentraciones de agente disperso tras el disparo, pero no permite un adecuado seguimiento de la pluma de contaminante.

3.7.5.1.3 CCTV + linterna LED

La intensidad de la luz solar depende de multitud de variables fuera de nuestro control, por lo que se implementó al sistema de monitorización un foco intenso de luz LED (Figura 63), para generar zonas de penumbra donde poder observar una evolución cualitativa de la nube generada de contaminante, la interacción de esta nube de contaminante con la niebla generada y la eficiencia de limpieza de las diferentes nieblas generadas. Se escogió, por tanto, este último método de detección para la realización de una batería de ensayos preliminares cuyo fin era establecer los siguientes parámetros:

- Procedimiento de dispersión del compuesto.
- Tiempo aproximado de permanencia del compuesto en el ambiente, dinámica de la nube de polvo.
- Diferencias en las nieblas generadas con las dos boquillas y dinámica de la niebla.
- Efecto de la niebla en el material disperso.
- Tiempos de las distintas fases del proceso, secuencia del experimento.

3.7.5.2 Técnicas ópticas cuantitativas

Para una mayor precisión, se utilizaron técnicas cuantitativas. Mediante esta técnica, se determinará el TOF de la nube de contaminante o aerosoles generados y los

tiempos de limpieza de cada una de las nieblas probadas. Esta técnica se describe a continuación.

3.7.5.2.1 CCTV + detector de partículas

El TOF de las partículas de los compuestos analizados, así como la eficiencia del proceso de limpieza, se midieron con más precisión mediante un contador de partículas compuesto por un láser de diodo y unas lentes colimadoras cilíndricas. Al impactar el haz láser sobre las partículas, se produce un fenómeno de dispersión de la radiación incidente, la cual es recogida y focalizada por las lentes sobre el sensor, incrementándose el marcador de conteo en una unidad.

El instrumento utilizado es el modelo 8306 Handheld Particle Counter de Particles Plus Inc. (Figura 64) capaz de medir tamaños de partícula comprendidos en el intervalo entre $0.3 - 25 \mu\text{m}$ con un flujo de succión de aire de $2.83 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. El equipo posee 6 canales de medida simultáneos, así como detector de temperatura (intervalo de medida de $0 - 50 \text{ }^\circ\text{C}$) y humedad (intervalo de medida de $15 - 90 \%$).



Figura 61. Difracción de la luz natural causada por la dispersión de la nube de polvo en la atmósfera.



Figura 62. Sistema CCTV acoplado con un sistema láser. Las imágenes muestran la difracción láser.



Figura 63. Imagen obtenida del Counterfog-Lab gracias al sistema CCTV y la incorporación de un foco de luz LED.



Figura 64. Contador de partículas "Particle Plus".

3.8 Códigos para simulación y modelación

3.8.1 Selección de materiales

A través del programa “CES Selector” [109], se realizó una primera selección de materiales para la fabricación de las boquillas en base a sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, coste y condiciones de trabajo a las que iba a estar sometida la boquilla.

El programa CES Selector está basado en los diagramas de Ashby [110, 111]. A través de estos diagramas se estudiaron las propiedades más importantes para el sistema de boquillas y se seleccionó el material de inicio más conveniente. La selección se basó fundamentalmente en las propiedades mecánicas del material, dado que las elevadas presiones previstas de uso implicaban altas solicitaciones mecánicas.

3.8.2 Evaluación de tensiones

Mediante el programa “SolidWorks” [112] y con su aplicación de simulaciones exprés, se analizaron las tensiones acumuladas en cada una de las piezas mediante la teoría de VM [113], suponiendo las condiciones más desfavorables, como que la boquilla estuviera obstruida o fugando. Estos análisis fueron realizados en los dos modelos de boquilla, a todas las escalas propuestas, para estudiar la influencia del tamaño de la boquilla, y por tanto, del espesor de las paredes de la boquilla en la concentración de tensiones.

Además, se utilizó el programa ANSYS [92] para realizar simulaciones del conjunto completo de la boquilla seleccionada B 1:2. En estas simulaciones se supuso un funcionamiento normal del sistema y se realizó un análisis estático de tensiones estudiando las tensiones máximas generadas y los desplazamientos en función de los diferentes contactos y fricciones que pudieran experimentar las piezas de la boquilla. Asimismo, se realizó un análisis de la vida útil de la boquilla.

Este tipo de simulaciones se basan en el criterio de Von Mises o energía máxima de distorsión [113, 114]. La teoría de la energía máxima de distorsión supone que la parte hidrostática de un estado de esfuerzo, sea tracción o compresión, no afecta a la fluencia y que la fluencia ocurre cuando la energía de deformación por unidad de volumen asociada con la parte del estado de esfuerzo que causa la distorsión alcanza un valor crítico. El valor crítico corresponde a la energía de distorsión por unidad de volumen que existe en una probeta para ensayo a tracción en estado de fluencia [115]. Esta teoría se representa en la Figura 65.

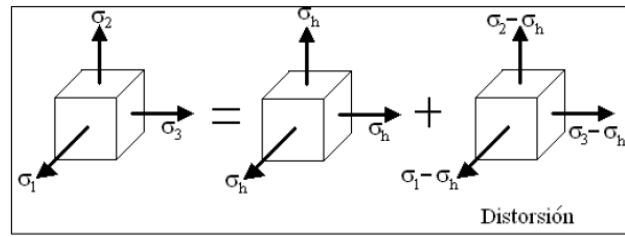


Figura 65. Estado general del esfuerzo [115].

De acuerdo con la teoría de Von Mises, un sólido dúctil cederá cuando se alcance una densidad de energía crítica para el material. Este valor de energía se puede estimar a partir de un ensayo uniaxial. En un ensayo de tracción uniaxial, el esfuerzo principal viene dado de la siguiente manera $\sigma_1 = \sigma_y$ (tensión de rotura) y $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. La energía asociada a la ruptura es la siguiente (ver Ec. <3>):

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_y^2 \quad <3>$$

Esta es la energía de rotura del material. De acuerdo con el criterio de Von Mises, la energía de rotura de un material sometido a un esfuerzo de tensión multiaxial es igual o mayor que el valor crítico del material (ver Ec. <4> y <5>):

$$\frac{1+\nu}{3E} \sigma_{VM}^2 \geq \frac{1+\nu}{3E} \sigma_y^2 \quad <4>$$

$$\sigma_{VM}^2 \geq \sigma_y^2 \quad <5>$$

Por tanto, la teoría de la energía de distorsión puede establecer el límite del material cuando la tensión de Von Mises excede el límite de tensión obtenido en un test uniaxial. La ecuación de Von Mises (Ec.<6>) quedaría de la siguiente manera:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad <6>$$

Para dos dimensiones $\sigma_3 = 0$, la tensión de Von Mises puede ser definida mediante la siguiente Ec.<7>:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad <7>$$

En términos generales, las componentes de la tensión son las siguientes (Ec.<8>):

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx} \sigma_{yy} + 3\tau_{xy}^2} \quad <8>$$

Esta ecuación en dos dimensiones describe una elipse (Figura 66). El interior de la elipse define la región donde se combinan los esfuerzos biaxiales y en la cual el material no rompe. Considerando una situación en la que únicamente existe un esfuerzo cortante, de manera que $\sigma_x = \sigma_y = 0$ y $\tau_{xy} = \tau$, para esa situación, el principal estrés es $\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau$ y $\sigma_3 = 0$. En el plano de $\sigma_1 - \sigma_2$ el esfuerzo es cortante y está representado por una línea recta con origen en -45° . La línea corta la elipse de Von Mises en dos puntos A y B. La magnitud de σ_1 y σ_2 en este punto viene dada por la siguiente ecuación (Ec. <9> y <10>):

$$\sigma_Y^2 = \sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_1 + \sigma_1^2 = 3\sigma_1^2 = 3\tau_{máx.}^2 \quad <9>$$

$$\tau_{máx.} = \sigma_1 = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} = 0.577\sigma_Y \quad <10>$$

Por lo tanto, en un esfuerzo puramente cortante, la tensión del material cuando está sometido a un esfuerzo cortante alcanza 0.577 de σ_Y . Este valor puede ser comparado con el máximo esfuerzo cortante de Tresca.

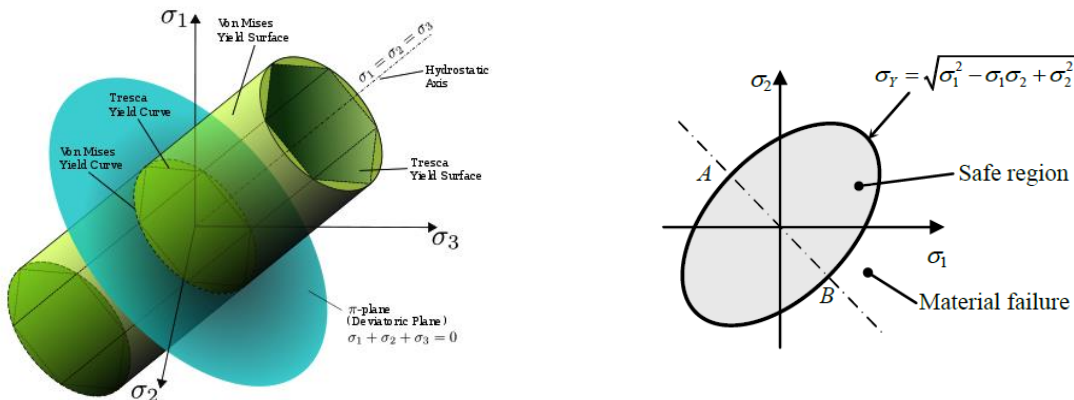


Figura 66. Zonas de seguridad en función de las diferentes aproximaciones teóricas. La teoría de Von Mises es la más conservadora.

3.8.3 Modelación termodinámica

Para los cálculos de solubilidad del aluminio, se realizaron diagramas de Pourbaix, empleando el programa Medusa – Hydra de diagramas de equilibrio [116], que permite a partir de sus bases de datos termodinámicas calcular la estabilidad de las fases en función de las condiciones de ensayo consideradas.

3.9 Procedimientos de ensayos de contramedida

A continuación, se muestran los procedimientos experimentales de los ensayos realizados que permitirán comprobar la eficacia de los sistemas generadores de neblinas estudiados en el presente trabajo de investigación. Todos los ensayos se realizaron como mínimo un número impar de veces mayor que uno.

3.9.1 Ensayos de caracterización del comportamiento de los simuladores NR

3.9.1.1 *Puesta a punto del sistema de dispersión del agente contaminante*

Estos ensayos se realizaron para optimizar el método de dispersión (ver punto 3.5.1 del procedimiento experimental) y el método de detección comentado en el punto 3.7.5, así como para establecer el procedimiento operacional de los diferentes ensayos. Para ello, se realizaron ensayos de dispersión de NaCl, NaHCO₃ y Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂ y se siguió la evolución del aerosol mediante un foco de luz (ver resultados en el punto 4.6).

3.9.1.2 *Monitorización cuantitativa de la pluma de contaminante*

A continuación, mediante la utilización del detector de partículas, se llevaron a cabo ensayos en los cuales se cuantificó el número de partículas por unidad de tiempo. Gracias a ello, se pudo analizar con más detalle la evolución de la pluma de contaminante y medir el TOF del compuesto dispersado. Estos ensayos se realizaron con NaHCO₃, Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂, CO(NH₂)₂, CsCl y KH₂PO₄. En el punto 4.7 pueden verse estos resultados.

3.9.2 Ensayos de descontaminación

3.9.2.1 *Ensayos preliminares de interacción agente/niebla*

Basándonos en estudios previos de caracterización de la niebla dispersada por las boquillas, estudio realizado por J.L. Perez Díaz et al. [96], se propusieron dos tipos de ensayos iniciales. El objetivo de estos experimentos era observar y valorar la influencia de las presiones de agua y aire utilizadas para generar la niebla en la interacción de la niebla con el contaminante dispersado. Así, los ensayos realizados se agruparon en:

- Nieblas generadas a bajas presiones de agua y aire. Con estas condiciones se genera una niebla de baja densidad de gotas, formada por un tamaño de gota grande. Su tiempo de residencia en el laboratorio es breve.
- Nieblas generadas a bajas presiones de agua y medias-altas de aire. Bajo estas condiciones se produce una niebla de alta densidad de gotas y menor tamaño de partícula. Su tiempo de residencia en la sala es mayor.

Los ensayos se realizaron con las boquillas fabricadas a escala 1:2, ya que el área de acción de este tamaño era el que mejor se adecuaba al volumen del laboratorio. Las

de escala 1:1 producen conos de niebla demasiado grandes para el recinto de ensayo, además de presentar altos consumos de aire/agua. Por el contrario, las escaladas a 1:3 presentan un reducido alcance y su uso requeriría la disposición de varias boquillas en serie, lo que dificulta el sistema para los ensayos en este laboratorio.

Al ser este un trabajo de investigación realizado en colaboración con otros grupos de investigación, es el grupo dirigido por J.L. Pérez Díaz [96] el encargado de optimizar los parámetros de uso de las boquillas para la obtención de una niebla con una determinada distribución de tamaño de gota.

Los agentes utilizados para estos primeros ensayos fueron $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, NaHCO_3 y NaCl . Las condiciones y parámetros de operación fueron los siguientes;

Las condiciones ambientales:

- Temperatura del laboratorio 20 °C.
- Humedad relativa del 90 %. Esto es debido a que una vez que se inician los ensayos, la humedad se eleva y es imposible de regular en ensayos en serie.

Dispersión del material:

- Cantidad de agente dispersado: ≈ 2 g con una distribución de partícula de tamaño micrométrico para favorecer su suspensión.
- Se realiza mediante la explosión de globos con una línea de presión de aire de 0.2 MPa.

Generación de la niebla:

- Condiciones de funcionamiento de las boquillas B y F escaladas a 1:2:
 - Niebla de gota gruesa:
 - $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3 - 0.4$ MPa.
 - $P_{\text{aire}} = 0.5 - 0.6$ MPa.
 - Niebla de gota fina:
 - $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3 - 0.4$ MPa.
 - $P_{\text{aire}} = 1.2 - 1.3$ MPa.

La secuencia de ejecución del procedimiento experimental se estableció en base a los siguientes pasos:

- Dispersión del material pulverulento. Se explota un globo que contiene el agente.
- Tiempo de espera. Es el tiempo necesario para una lograr una distribución lo más homogénea posible del material en el laboratorio. Este tiempo dependerá del compuesto dispersado y se determina con los ensayos de seguimiento/monitorización de la pluma de contaminante en seco (punto 4.6).

- Disparo de la niebla. Se realizan disparos cortos de 30 s de duración, en los cuales se llena rápidamente la sala de niebla. Este tiempo fue determinado en el trabajo de caracterización de nieblas realizado por la UAH [96].
- Deposición de la niebla. En esta etapa se espera a que la niebla se deposite y arrastre con ella los contaminantes. La idoneidad de la niebla dependerá de la capacidad de arrastrar con ella el agente disperso, lo que a su vez depende de la interacción niebla-agente y de su tiempo de permanencia en el ambiente. Esto va a poder ser observable mediante el sistema de CCTV en las zonas de penumbra generadas por la linterna LED. Los resultados pueden analizarse en el punto 4.8.

Todos los ensayos se repitieron un número de veces superior a cinco, descartando los ensayos fallidos.

3.9.2.2 *Ensayos de cuantificación*

Una vez analizados los resultados de los ensayos anteriores, se seleccionó el modelo de boquilla y las combinaciones de presiones, que llevaron a cabo una limpieza de la sala con mayor efectividad y se realizaron diferentes ensayos de nuevo con NaHCO_3 y $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, así como con $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, CsCl y KH_2PO_4 . Esta vez se utilizó el detector de partículas. Además, se implementaron los aditivos seleccionados a la niebla, en caso de ser necesarios. La metodología a seguir es la misma que en los ensayos anteriormente descritos y los resultados pueden observarse en el punto 4.9 del presente trabajo de investigación.

4. Resultados y discusión

4.1 Diseños iniciales y rediseños de las boquillas

Como uno de los hitos principales del presente trabajo de investigación destaca la fabricación de las boquillas COUNTERFOG. Para ello fue necesario el estudio de los diseños teóricos y sus consecuentes modificaciones para una correcta fabricación. En los puntos que se presentan a continuación, se pretende mostrar el trabajo realizado en ese sentido.

4.1.1 Modificaciones propuestas al diseño original

En este primer rediseño, se introdujeron modificaciones de carácter general en los planos como son cotas y tolerancias. Para esto, se tuvo en cuenta la norma UNE 1-039-94 [117] en la que se definen los principios generales de acotación, y para las tolerancias la normativa UNE-EN ISO 286-2 Sistema ISO de tolerancias [118], donde se establecen los grados de tolerancias normalizados y desviaciones de límite en agujeros y ejes. La razón fundamental de estas implementaciones es hacer entendibles y fabricables los planos por cualquier taller comercial.

Asimismo, se realizaron diversos cambios técnicos. Entre ellos se destacan la introducción de juntas de sellado y la modificación de piezas para adecuarlas a las técnicas de fabricación seleccionadas y al correcto montaje y uso. En base a la normativa ISO-3601-1 [119] e ISO-3601-2 [120], se introdujeron diferentes o-ring entre las piezas internas (Figura 67 y Figura 68) para favorecer la estanqueidad de la boquilla, evitando así posibles fugas, lo cual mejora el rendimiento de la boquilla.

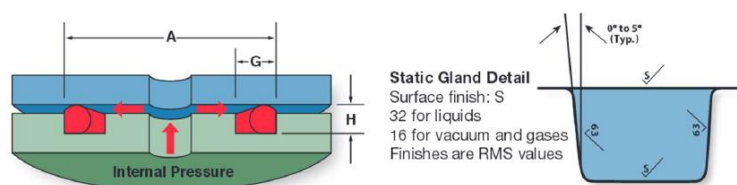


Figura 67. Selección del tipo de junta tórica a utilizar en función del uso [90].

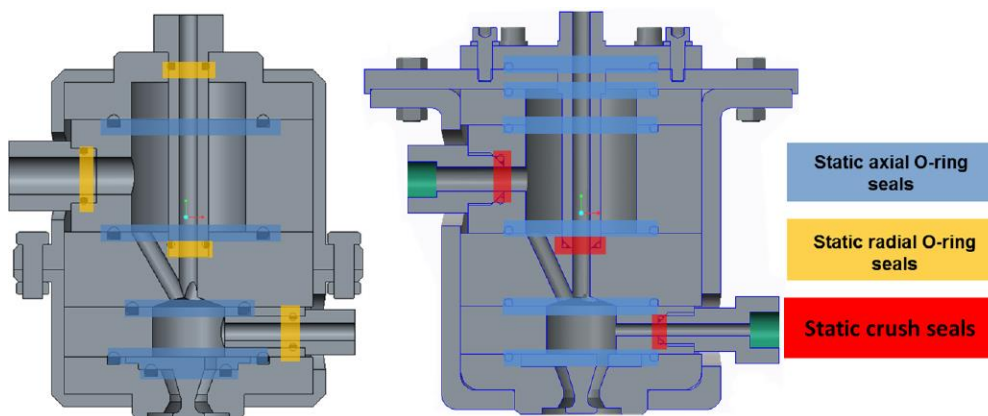


Figura 68. Posición inicial de las juntas frente a la posición final de las mismas en base a la normativa aplicable. Se muestra en concreto la boquilla B con la carcasa y entrada de agua modificadas del diseño final [91].

De manera específica y para cada uno de los diseños seleccionados, en los apartados siguientes se detallan las modificaciones realizadas en función de los diseños.

4.1.1.1 Modelo B

En el modelo de boquilla B se realizaron las siguientes modificaciones:

- Entrada de agua: se modificó esta entrada para la adecuada sujeción de la misma con tornillos a la pieza de la carcasa superior, con la finalidad de repartir adecuadamente las tensiones y mejorar la fijación (Figura 69).
- Carcasas exteriores: las dos piezas que componen la carcasa exterior se modificaron variando la situación del cierre, para facilitar en montaje y la sujeción de la boquilla (Figura 69). Además, se curvaron las aristas y se aumentó ligeramente el espesor de la carcasa para favorecer la integridad del sistema de boquillas.
- Entrada de aire y de partículas: se recolocaron los o-ring, se seleccionó la rosca adecuada normalizada (Figura 69) y se incorporaron caras planas en los exteriores de ambas piezas, para así favorecer el apriete de las mismas en el montaje.
- Nozzle_insert: en la pieza interna de salida de la boquilla (Figura 70), se modificaron los ángulos de las tres aberturas por las que fluye la niebla para ajustarlas al tipo de broca que podía utilizarse en el taller del CIEMAT y se simplificó el diseño.
- Outlet_nozzle: se corrigieron defectos de ensamblable con la pieza contigua anteriormente comentada y se curvaron los bordes (Figura 69).

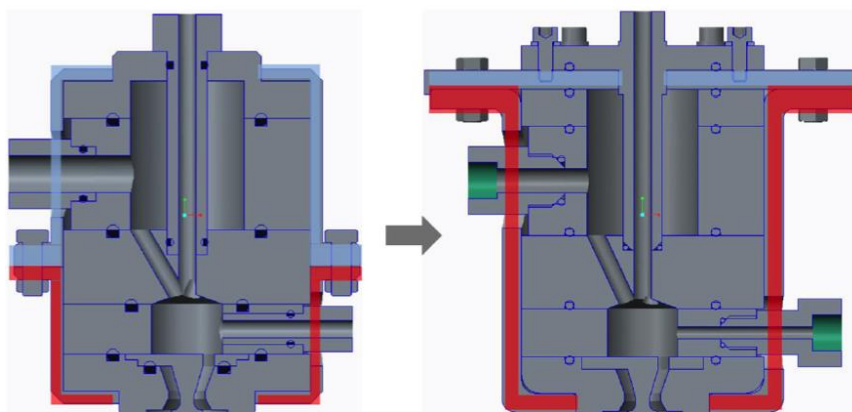


Figura 69. Modificación de la carcasa exterior para la boquilla B [91].

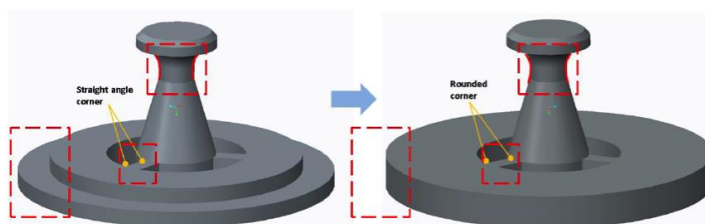


Figura 70. Modificación de los ángulos de las piezas para su ajuste en fabricación [91].

4.1.1.2 Modelo F

En lo que respecta al modelo de boquilla F, se realizaron las siguientes modificaciones:

- Entrada de agua: se modificó la entrada de agua para permitir su sujeción con tornillos, como en el caso del modelo B de boquilla, con la tapa superior.
- Carcasas exteriores: aunque son modelos diferentes, con distinta distribución de entradas de fluidos, se mantuvo el mismo tipo de carcasa exterior para ambos diseños, difiriendo únicamente en el tipo de taladros centrales de la tapa superior donde se fija la entrada de agua, pero, sin embargo, el formato general se mantuvo y se rediseñó en base a las modificaciones ya realizadas en la boquilla B (Figura 69).
- Entrada de aire y de partículas: como en las entradas del modelo B, también se modificaron. Se ajustó la posición de los o-ring, se seleccionó la rosca adecuada y se incorporaron caras planas en los exteriores de todas las piezas, para favorecer el apriete de las mismas en el montaje.
- Outlet_nozzle: en esta pieza se rectificó el cono de salida para favorecer la generación del cono de niebla apropiado. También se modificaron sus acabados y espesores.
- Swirl_insert: esta pieza es clave en el diseño. En primer lugar, se añadieron unos tornillos para sujetar esta pieza a la contigua Swirl_inser_F_container, que se subdividió en dos nuevas piezas adapter_swirl_UCIIM y swirl_insert_F_container (Figura 71). Asimismo,

para la fabricación de estas piezas se simplificó la forma de los canales por los cuales fluye el agua igualando la profundidad y prescindiendo del ángulo de inclinación.

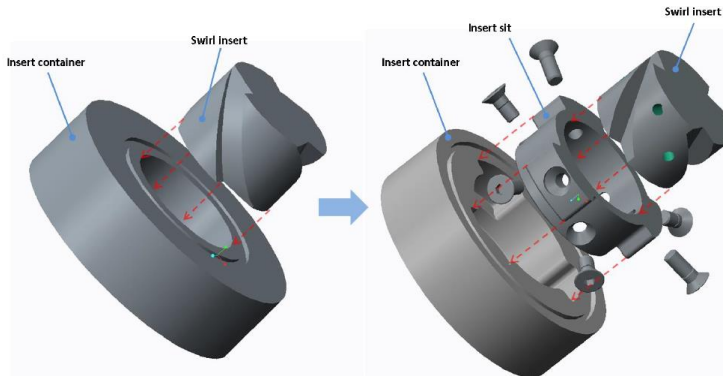


Figura 71. Modificación de las sujeciones de la pieza helicoidal del modelo F [91].

4.1.2 Comprobaciones de rediseño previas a la fabricación

Previamente a la fabricación de las primeras boquillas de cada uno de los modelos diseñados, STR comprobó computacionalmente que las modificaciones de estas piezas no alteraban en el funcionamiento normal de la boquilla [91]. Los resultados se mostraron en la Tabla VI del procedimiento experimental (ver punto 3.2.1). Entre los requerimientos de funcionamiento esperados de la boquilla, destacan los siguientes:

- Ha de ser válida para su operación en interior de edificios y en exteriores y en presencia de fuego y agentes NRBQ.
- La distribución de tamaño de gota debe encontrarse en el intervalo de 1 – 1000 μm . Sin embargo, para una buena eficiencia de las boquillas se pretenden conseguir rangos de tamaño de partícula de agua próximos a 1 – 100 μm .
- Un flujo de agua del orden de $2 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Para ensayos en el laboratorio se redujo ese consumo hasta valores por debajo de $0.1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Esto es debido a las dimensiones de la sala de ensayo y a la saturación de los detectores utilizados.
- La boquilla ha de ser capaz de mezclar o emulsionar tres fluidos: agua, aire y soluciones descontaminantes.

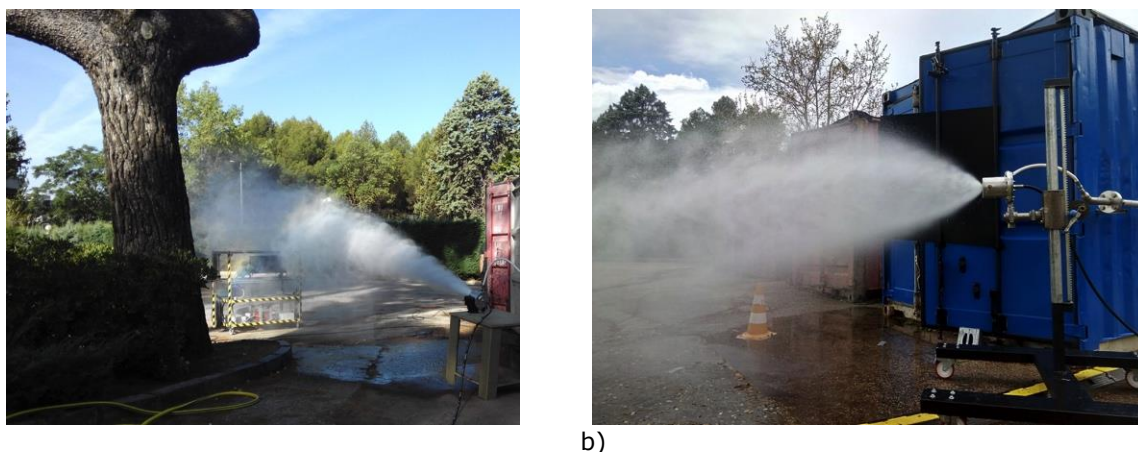
De las simulaciones de verificación de los rediseños y ajuste de determinados parámetros, como es el caudal de agua, para comprobar su influencia en la generación de nieblas, pudo constatar que la reducción del diámetro del orificio de salida genera una niebla con una distribución del tamaño de gota menor. Un efecto similar en la distribución del tamaño de gota se produce al incrementar los diámetros internos de las piezas centrales de la boquilla o bien los ángulos de interacción del agua y el aire. Además, se comprobó que para tener un mejor control y conseguir una disminución en el caudal de agua bastaba con reducir los diámetros internos o bien el diámetro de

salida de la boquilla, esto último concuerda con una reducción en la distribución del tamaño de partícula de la niebla.

En cuanto a la influencia de la presión de agua y aire empleadas indicar que: un aumento de la presión de agua aumenta su caudal y la distribución de tamaños de diámetros de gota generados es mayor. Mientras que, incrementos en la presión de aire disminuyen el caudal de agua, aumentado el de aire, apreciándose en algunos casos una disminución del tamaño de gota de agua generado. Por último, indicar que la distribución de tamaño del diámetro de gota generada muestra una gran dependencia de la distribución de presiones a las que se esté trabajando [91].

Para la fabricación del primer prototipo fue necesario realizar una selección de materiales (ver punto 4.2) y la caracterización del material base elegido (ver punto 4.3), así como un análisis de tensiones de la boquilla en operación (ver punto 4.4). Seguidamente, se procedió a la fabricación del primer prototipo en base a los aspectos comentados en el punto 3.4 del procedimiento experimental.

Una vez se fabricaron los dos primeros prototipos, comprobándose la viabilidad de fabricación de los mismos, se realizaron las primeras pruebas de funcionamiento en exteriores (ver Figura 72).



a) **Figura 72.** Pruebas de funcionamiento del primer prototipo fabricado escala 1:1. a) Primeras pruebas con una P_{H_2O} de 1.5 MPa y un P_{aire} de 2.8 MPa. b) Pruebas con una P_{H_2O} de 0.5 MPa y un P_{aire} de 0.5 – 0.8 MPa.

En estas pruebas, se constató que si se empleaban las condiciones de operación teóricas nominal, los caudales necesarios por la boquilla de agua y aire eran muy elevados y difíciles de mantener a escala de laboratorio (es decir, en ensayos continuos dentro del laboratorio). El cono de niebla generado era excesivamente grande para poder controlarlo en las salas de ensayo del laboratorio (ver Figura 72). Por ello, se estimó oportuno destinar las boquillas de este tamaño original (escala 1:1) a ensayos a escala real en exteriores. Por tanto, se propuso un segundo rediseño basado en el escalado de los dos primeros prototipos, que se aborda en el punto que sigue a continuación del presente trabajo de investigación.

4.1.3 Escalado de las boquillas originales

Una vez se decidió la necesidad de escalar los diseños, inicialmente se propuso escalar las boquillas a 1:2 y 1:4. Las simulaciones realizadas por STR para las boquillas con las nuevas dimensiones [91], demostraron que la escala a 1:4 no era viable, ya que sus consumos eran mínimos, generándose una niebla de baja densidad incluso a presiones altas de agua, y no reproducibles en la realidad (ver Tabla VI del punto 3.2.1). Es por ello, que se propuso el diseño a escala 1:3, para futuros usos en ensayos a escala real en lugares cerrados con un sistema de varias boquillas [77]. Para los ensayos a escala de laboratorio se seleccionó como óptimo, por razones de parámetros físicos y operatividad, la boquilla a escala 1:2.

Durante el proceso de fabricación de los nuevos prototipos de boquillas, los planos fueron modificándose reiteradamente al objeto de adecuar las piezas a los requerimientos de fabricación. El proceso de fabricación empleado fue idéntico al del primer prototipo comentado en el procedimiento experimental. El análisis de tensiones para determinar la influencia de la concentración de tensiones en espesores menores se mostrará en apartados posteriores (ver punto 4.4).

Las modificaciones de diseño propuestas durante el proceso de fabricación para las nuevas escalas de los prototipos se detallan en los apartados siguientes:

4.1.3.1 B 1:2

En el escalado de esta boquilla-prototipo se modificó la entrada de aire (inlet_air_S05), debido a que la pieza reducida a esta escala no era lo suficientemente larga para salvar los tornillos que cierran la boquilla. En la Figura 73, se muestra el plano donde se constata un detalle de la pieza, con las caras planas ya incluidas en los planos de fabricación.

4.1.3.2 F 1:2

Como en los casos anteriores, se incluyeron en los planos las caras planas hexagonales de las piezas de entrada de aire y partículas. En la Figura 74, se muestra como ejemplo el plano de la pieza de entrada de aire.

Al disminuir determinadas piezas y espesores a la mitad, en algunos casos, estas reducciones no pueden ser proporcionales ya que hay limitaciones que exigen conservar un espesor mínimo, por ejemplo, donde se ubican los hilos de las roscas de las piezas. Antes de la fabricación se comprobaron minuciosamente todas las interferencias posibles.

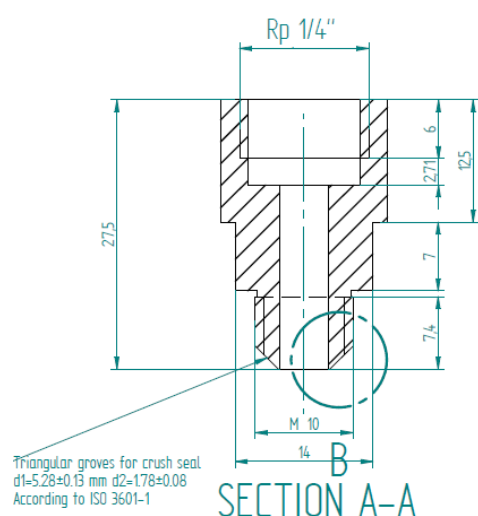


Figura 73. Entrada de aire B escala 1:2.

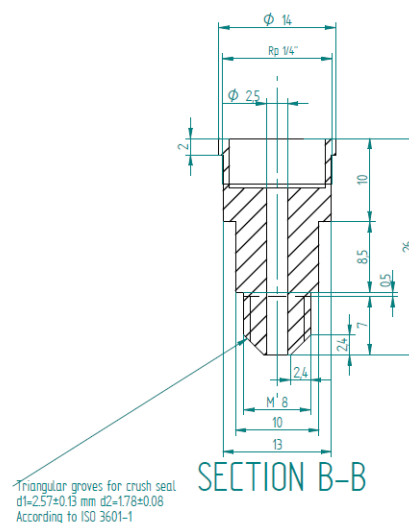


Figura 74. Entrada de aire F escala 1:2.

4.1.3.3 B 1:3 y F 1:3

Al reducir aún más los espesores y tamaños, se realizaron ajustes mínimos en algunas piezas, así como en sus tolerancias. Al haber realizado con anterioridad un escalado a 1:2, se obtuvo la experiencia necesaria para minimizar los errores y reducir el número de modificaciones posteriores.

4.2 Selección de materiales para la fabricación de las boquillas

La selección de materiales de la boquilla se va a centrar en el estudio de diversos candidatos teniendo en cuenta diferentes parámetros que se comentarán a lo largo de este punto del presente trabajo de investigación. A continuación, se expone una lista de materiales utilizados habitualmente en la industria para aplicaciones similares [76, 80-82, 121-124].

- Latón.
- Aleaciones de Al: AA 6082 - T6, AA 7075 - T6, etc.
- Aleaciones de Ti: Ti - 6Al -4V.
- Aleaciones de Fe: 4340 SS, 9310 SS, 317 L, 316 L, 317 SS, 316 SS, 303 SS.
- Rubí.
- Aleaciones de Ni: Hastelloy, Ni - Superalloy.
- Aleaciones de W: W - C- Co y W - Cr - Co.
- Aleaciones Co - Ni: Tribaloy 400.

El siguiente paso a seguir, fue la evaluación del comportamiento de cada uno de estos materiales y sus aleaciones, en función de los diferentes parámetros que se

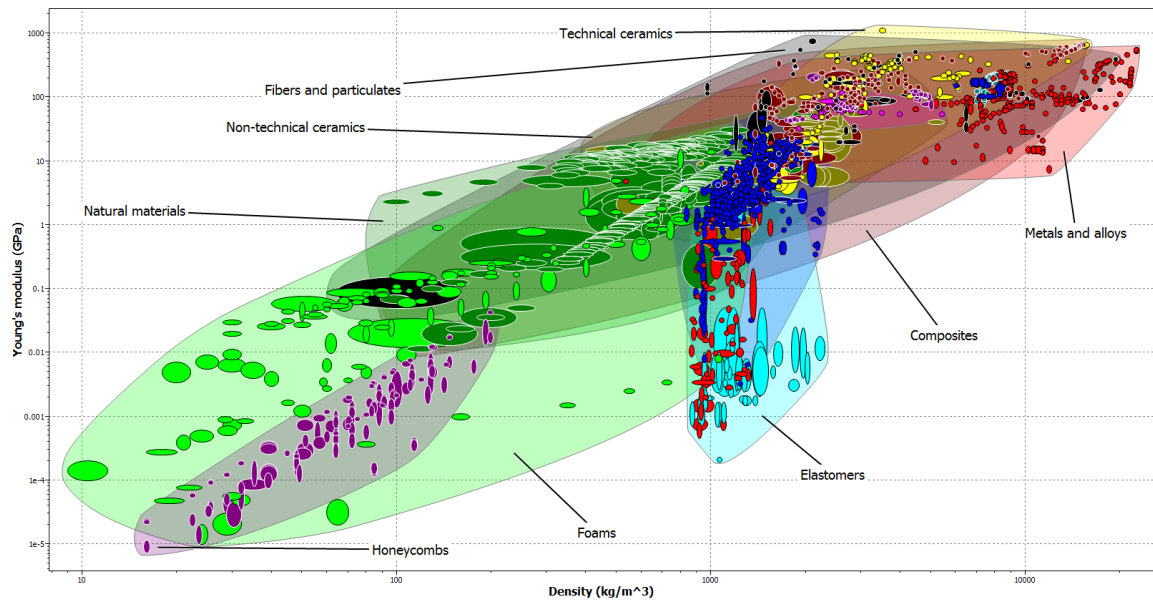


Figura 76. Módulo de Young frente a densidad [109].

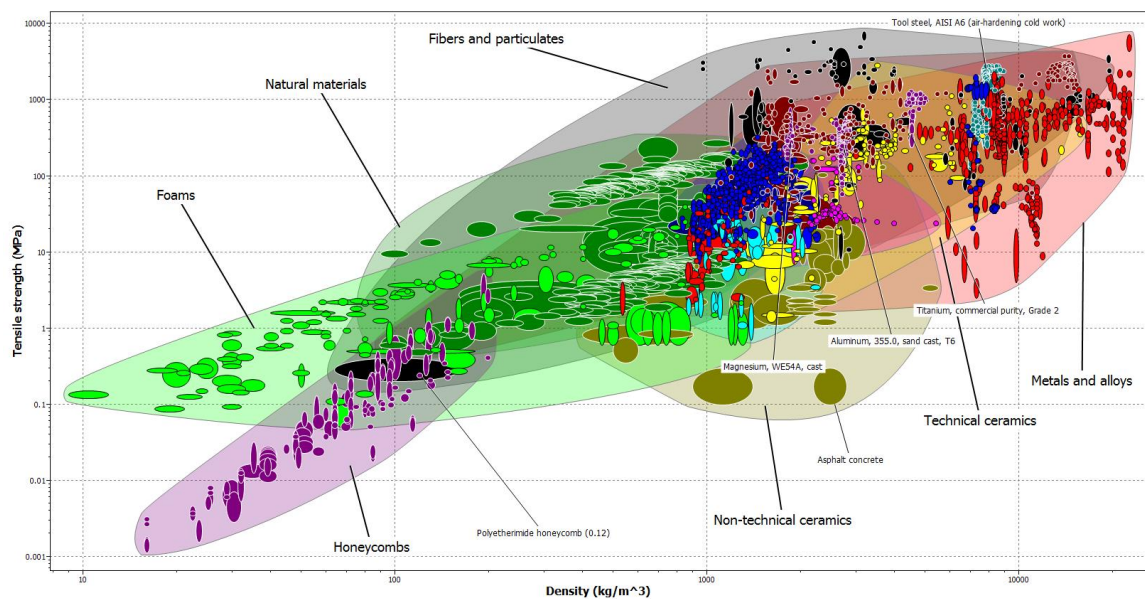


Figura 77. Resistencia a la tracción frente a densidad [109].

Por otro lado, en el gráfico de la Figura 78, se representa el Módulo de Young frente a la resistencia a la tracción, en el cuál se puede ir viendo cuales son los materiales que ofrecen unas mayores solicitaciones mecánicas.

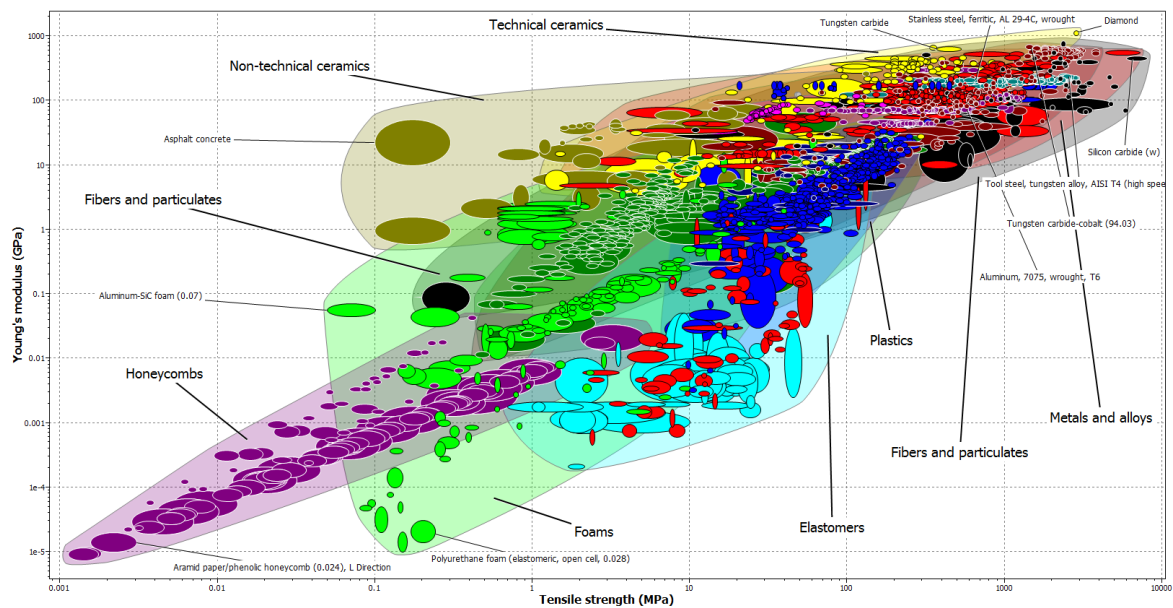


Figura 78. Módulo de Young frente a la resistencia a la tracción [109].

Asimismo, debido a la utilización de este tipo de boquillas en situaciones de emergencia en presencia de fuego y altas temperaturas, es necesario valorar sus propiedades mecánicas así como su temperatura máxima de servicio (ver Figura 79).

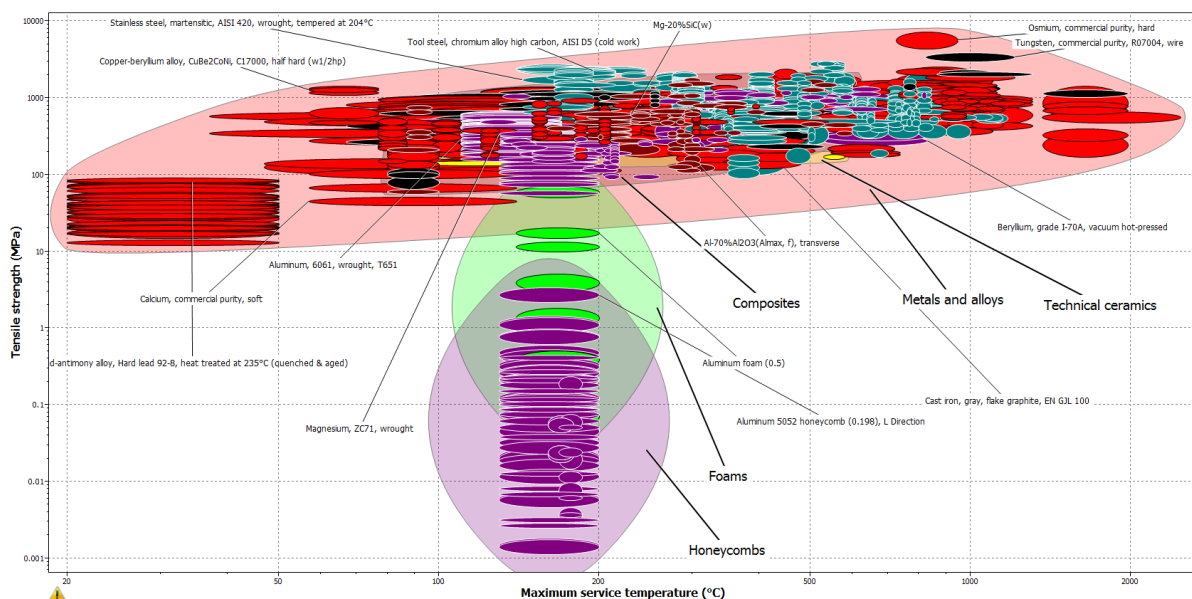


Figura 79. Resistencia a la tracción en función de la temperatura de trabajo [109].

Además, en la Figura 80, se muestra un gráfico que representa la facilidad a la hora de la manufactura frente al precio de materiales metálicos. Ambas son también de elevada importancia una vez aseguradas las sollicitaciones mecánicas. Las boquillas han de ser comerciales y competitivas, lo que puede asegurarse con un coste bajo de materia prima y un proceso sencillo de mecanizado.

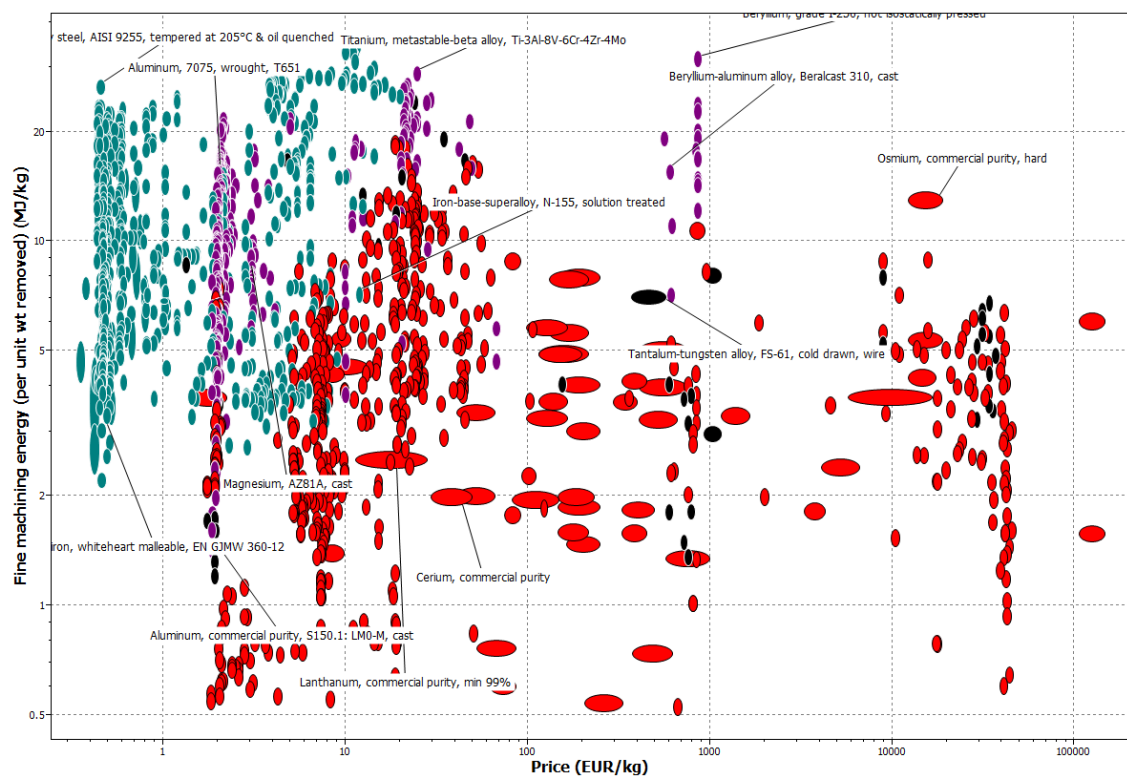


Figura 80. Facilidad de manufactura frente al coste económico del material [109].

Y por último, en la Figura 81, se muestra un gráfico en el que se representan diferentes materiales en función de su resistencia a la tracción y su tolerancia a la exposición al agua. Este hecho es importante en función de las atmósferas a las que vaya a estar expuesta la boquilla en su vida útil.

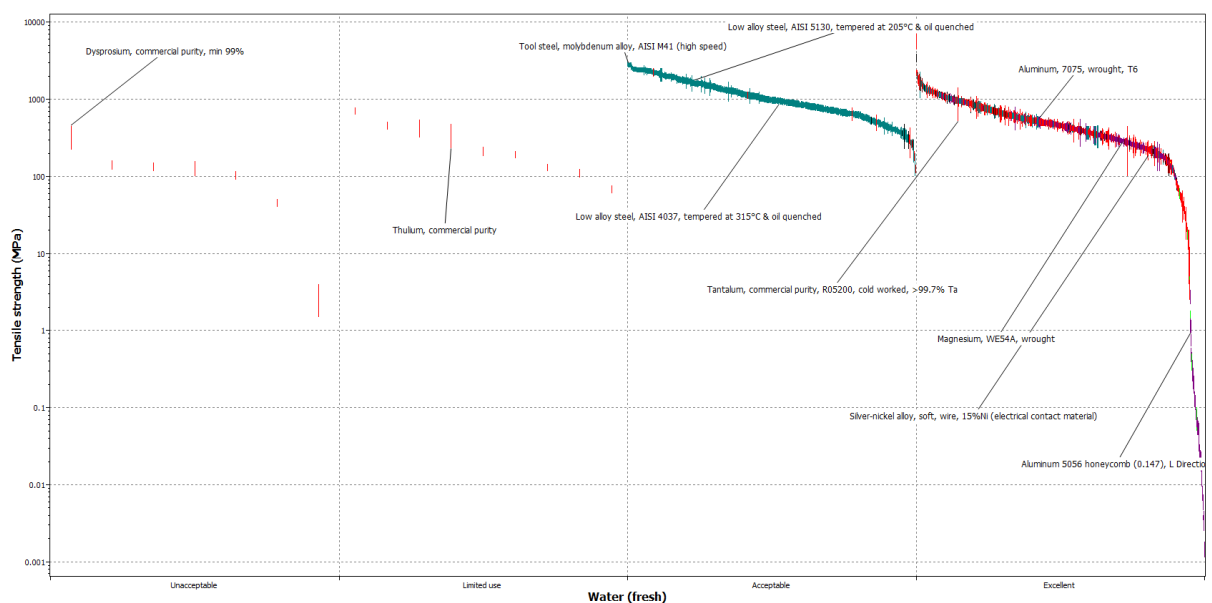


Figura 81. Comportamiento del material frente a la corrosión en presencia de agua [109].

Tal y como se muestra en los gráficos, el número de materiales posibles existentes es infinito. El listado de materiales disponibles es amplio y es necesario acotarlo para una buena selección de materiales, sin recurrir necesariamente a materiales

tradicionales. Gracias al proceso de selección de materiales, se va a poder partir de un diseño o concepto inicial, para el cual todos los materiales mostrados anteriormente podrían ser candidatos; pero mediante un proceso de diseño se podrá realizar una sub-selección de materiales, y finalmente, pasando a un mayor detalle, es posible seleccionar un número finito de materiales más adecuados para el diseño. Este proceso se llevará a cabo mediante herramientas de diseño. Estas herramientas requieren de un análisis de la aplicación, de una evaluación de las propiedades clave de diseño, de la aplicación del mismo, geometría, costes y, finalmente, será necesaria la realización de simulaciones que modelen el comportamiento del material elegido en funcionamiento, para corroborar su buen comportamiento antes de la selección final del material (ver punto 4.4).

Los gráficos presentados, muestran propiedades básicas como son la densidad, Módulo de Young, resistencia, etc. Con estos diagramas se pretende observar dónde se localiza cada una de las familias de materiales. En los gráficos de propiedades mecánicas frente a densidad, se puede observar como los materiales poliméricos, espumas, materiales naturales, etc., presentan una muy baja densidad, pero sus propiedades mecánicas no son buenas. Y, sin embargo, los metales y sus aleaciones, los materiales cerámicos y los materiales compuestos aun teniendo una mayor densidad presentan muy buenas propiedades mecánicas, propiedades muy importantes en nuestra aplicación. Por otro lado, no todos estos materiales con mejores solicitaciones mecánicas conservan esas propiedades a elevadas temperaturas, por lo que también es necesario tener en cuenta su temperatura máxima de servicio, reduciendo la lista inicial de familias de materiales a metales y sus aleaciones y a materiales cerámicos. Asimismo, el material seleccionado, dado el diseño modular de la boquilla, ha de facilitar un proceso de mecanizado y en base a su comercialización un bajo coste. Esto último, lleva a centrar el estudio de materiales en los metales y sus aleaciones, y en concreto, en base a sus propiedades mecánicas, densidad y precio, en los aceros (mostrados en color turquesa) y aleaciones ligeras (mostrados en color morado)

Como podrá verse a continuación (ver punto 4.2.2), el programa Ces - Selector permite trazar líneas guía que relacionan las propiedades representadas y así acotar valores mínimos y máximos para éstas. Permite seleccionar regiones completas con valores mínimos y máximos de cada una de las propiedades y, a su vez, relaciona todos y cada uno de los gráficos acotados, dando una lista de aquellos materiales que se encuentran en el interior de todas y cada una de las delimitaciones y exigencias de las propiedades, que se abordan en los siguientes puntos del presente trabajo de investigación.

4.2.1 Modelación base del comportamiento en operación

En base al diseño, el límite elástico y la resistencia a la tracción es un factor clave, así como la densidad y el coste económico del material, ya que influye en la viabilidad de reproducir el sistema. Tanto el precio como la densidad, se va a intentar minimizar lo máximo posible, pero la propiedad que va a determinar el material va a ser la resistencia mecánica. Para conocer la mínima tensión que ha de ser capaz de soportar

la boquilla, se realizaron unas simulaciones básicas de la pieza que se consideró más débil (dado su espesor y número de taladros) y se sobredimensionaron las posibles presiones de trabajo casi al doble.

Estas simulaciones se realizaron con una aleación básica y común de Al (AA 6061) sin ningún tipo de tratamiento. Los resultados obtenidos en la modelación se muestran en la Figura 82 y Figura 83. Para la aleación básica seleccionada en estas simulaciones, se aprecia cómo en determinadas zonas se sobrepasa el límite elástico del material. Durante su uso se podrían producir deformaciones catastróficas en la tapa de boquilla, por lo que este material no es un material adecuado para la realización de las boquillas. La aleación que se elija debe tener un límite elástico superior a 270 MPa para que no se produzca una deformación plástica en la boquilla y sea seguro el uso de la misma.

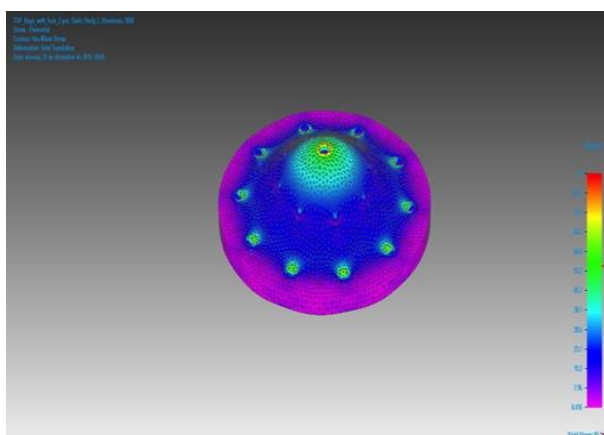


Figura 82. Representación esquemática del modelo de tensiones generadas en AA 6061 con límite elástico de 55 MPa sometido a un esfuerzo de 5 MPa en el 50 % de la tapa.

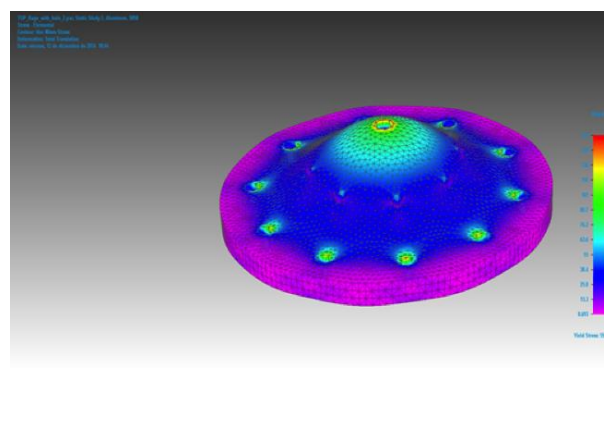


Figura 83. Representación esquemática del modelo de tensiones generadas en AA 6061 con límite elástico de 55 MPa sometido a un esfuerzo de 3 MPa en el 50 % de la tapa.

4.2.2 Optimización de la selección de materiales

Teniendo en cuenta el límite elástico de 270 MPa que deben de soportar los materiales propuestos, se van a acotar todos los gráficos en base a este límite y se van a intentar seleccionar aquellos materiales más ligeros y de precio más competitivo. La selección se centrará en materiales metálicos dadas las solicitudes técnicas que se necesitan.

En el gráfico de la Figura 84, se representa la relación entre la resistencia a la tracción de los materiales frente al precio. Los círculos de color turquesa son aceros, los rojos aleaciones de bronce y bronce-aluminio y los círculos morados corresponden a aleaciones ligeras de Al, Mg y Ti. Destacar que únicamente se representan coloreados, los materiales que se encuentran dentro de los rangos establecidos en todos y cada uno de los gráficos estudiados en este punto. En este gráfico, se constata que las aleaciones que presentan una mayor resistencia y menor costo son los aceros.

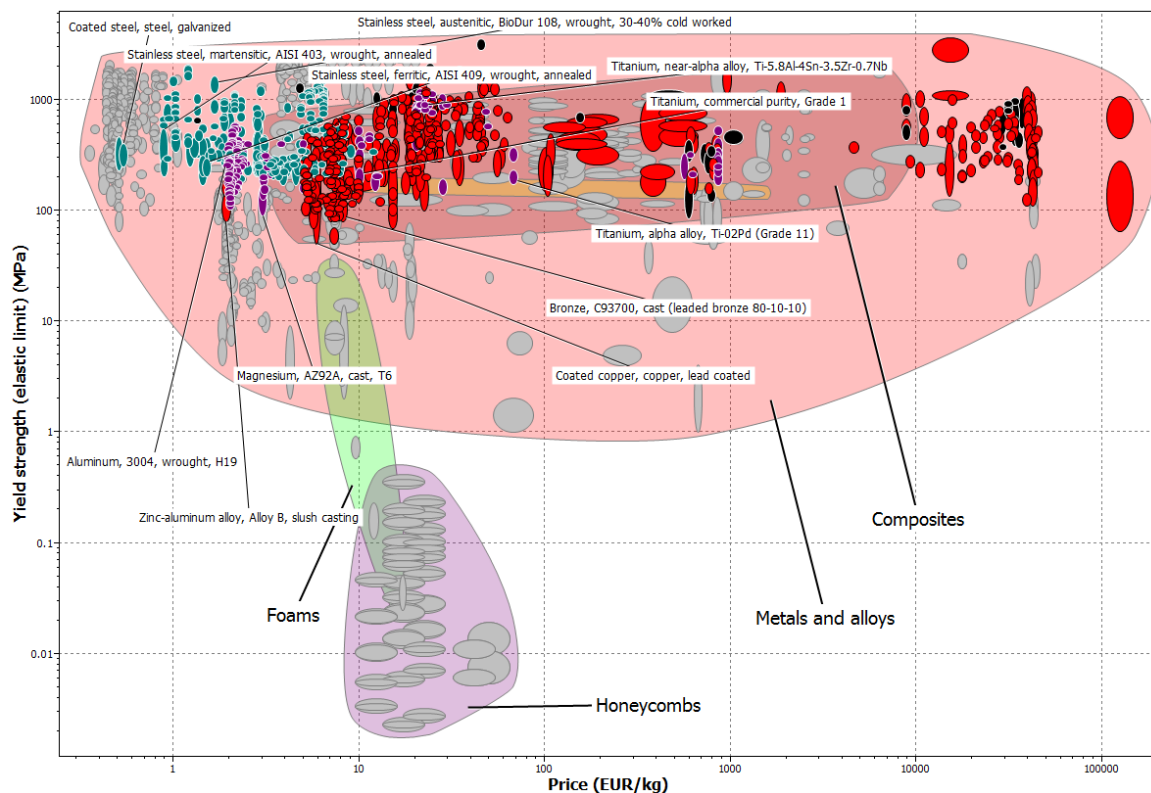


Figura 84. Límite elástico en metales superior a 270 MPa frente al coste del material.

El siguiente parámetro a considerar para la selección del óptimo candidato fue la relación entre el límite elástico del material y su densidad (ver Figura 85). Siguiendo el mismo proceso de evaluación antes mencionado, y considerando aleaciones con límites elásticos superiores a 270 MPa y densidades mínimas (pero evaluando solo aquellas que cumplen el criterio anterior, en color resaltado en la zona superior de la Figura 85), se verifica que son las aleaciones ligeras las que presentan una mayor resistencia y menor densidad. En concreto, las de Mg por delante de las de Al y estas por delante de las de Ti.

Por otro lado, se analizó el factor de la temperatura de trabajo (Figura 86). Tanto los aceros como las aleaciones ligeras, que en los gráficos anteriores han presentado las mejores propiedades, presentan un comportamiento adecuado a temperaturas de emergencia.

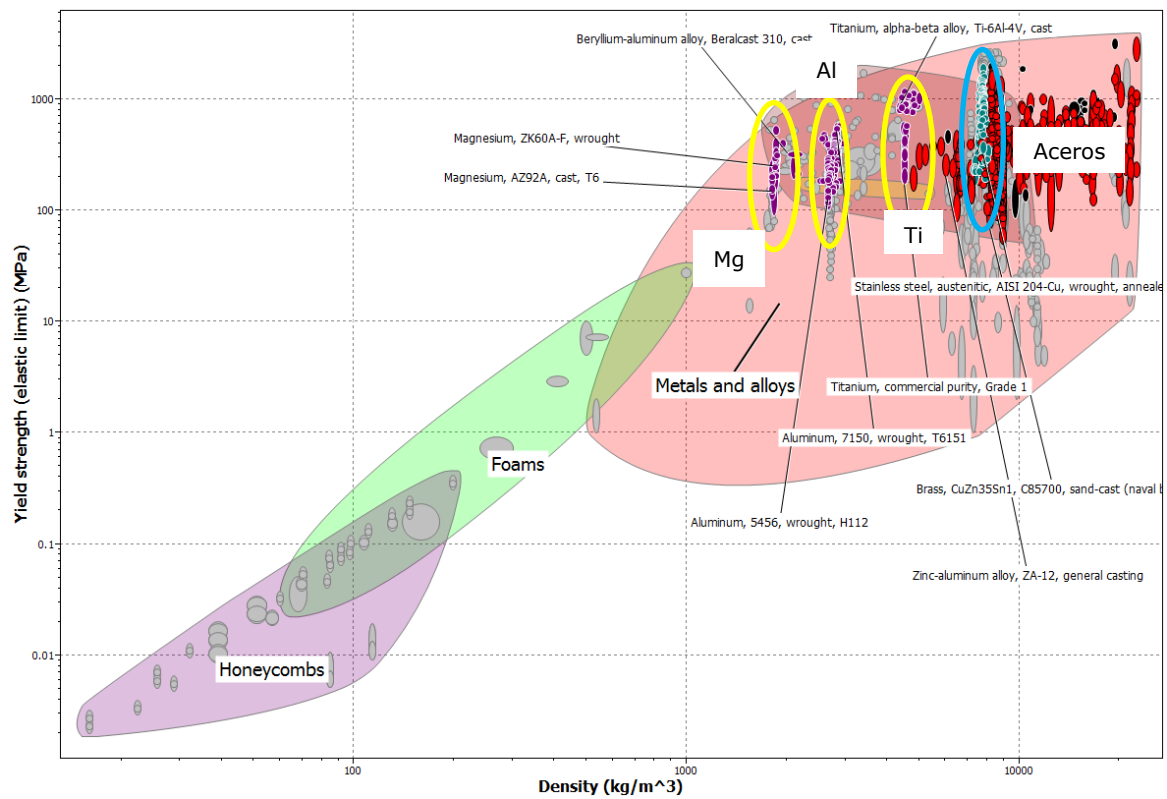


Figura 85. Límite elástico en metales superior a 270 MPa frente a la densidad del material.

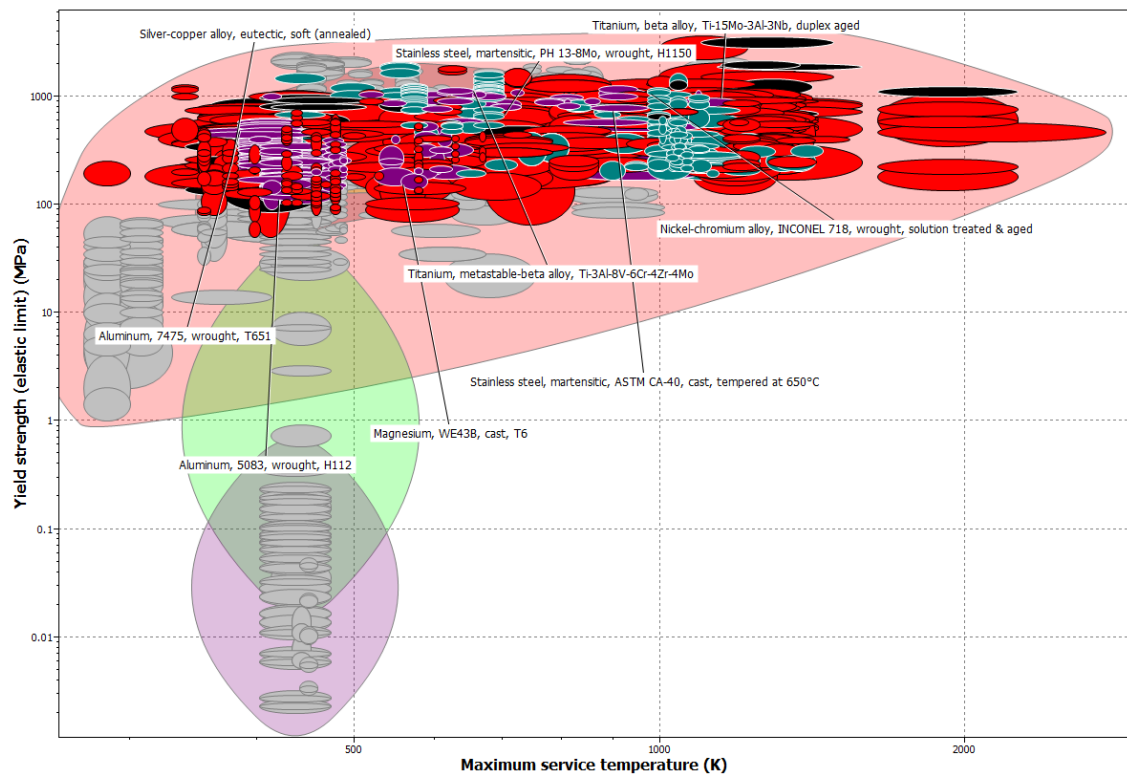


Figura 86. Influencia de la temperatura en el límite elástico. Selección de los materiales con límite elástico superior a 270 MPa.

El siguiente criterio de selección de materiales estudiado fue la resistencia a la exposición a agua frente a un límite elástico por encima de 270 MPa (ver Figura 87).

Este gráfico fue muy limitante para diferentes familias de aceros y en dicha figura se observa como las aleaciones ligeras, por lo general, presentan mejores propiedades. Y en concreto las aleaciones de Al, que eran menos ligeras que las de Mg pero más económicas. Otras aleaciones que presentan una buena resistencia a la corrosión son las aleaciones de Cu entre otras, pero ya fueron descartadas cuando se consideraban otros criterios de análisis, por ejemplo, el coste de material, coste de producción, peso, límite elástico, etc.

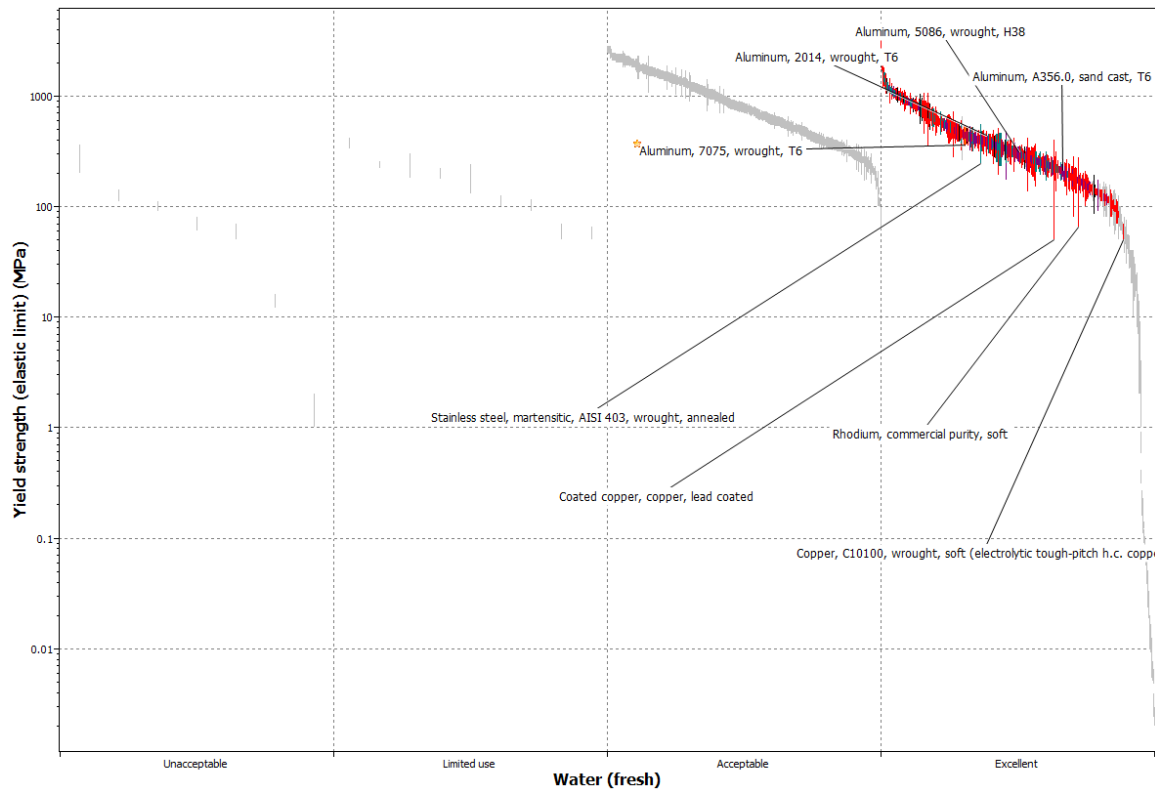


Figura 87. Influencia de la presencia de agua en los materiales seleccionados. Límites elásticos superiores a 270 MPa y un comportamiento frente al agua excelente.

En base al análisis realizado y los diagramas generados, el estudio se centró en las aleaciones de Al y sus posibilidades. La selección se basó, fundamentalmente, en su resistencia específica, su resistencia a la corrosión, en su baja densidad entre los diferentes metales mostrados, así como, en su coste económico medio. Además, no son aleaciones que presenten dificultad de procesamiento, es decir, se pueden mecanizar fácilmente y son susceptibles de endurecimiento por precipitación. Esto hace que la mayoría de este tipo de aleaciones puedan ser tratadas térmicamente para modificar sus propiedades mecánicas, presentando buenos comportamientos a mayores temperaturas y una buena resistencia a la corrosión, pudiéndose mejorar esta resistencia a la corrosión con diferentes recubrimientos.

Inicialmente se seleccionaron dos aleaciones ampliamente utilizadas:

- AA 6082 - T6 debido a su facilidad de mecanizado, su resistencia a la corrosión y la experiencia previa en los talleres del CIEMAT con este material y

- AA 7075 - T6 debido a su elevado uso y buenas propiedades mecánicas frente a su densidad.

En la Figura 88, se muestran las ubicaciones de estas aleaciones en un diagrama de resistencia específica.

Es importante remarcar que solo las aleaciones de Mg presentan una mayor resistencia específica para valores de resistencia a la tracción similares. Pero éstas presentan mayores costes, problemas en el proceso mecanizado y en la resistencia a la corrosión, que las de Al.

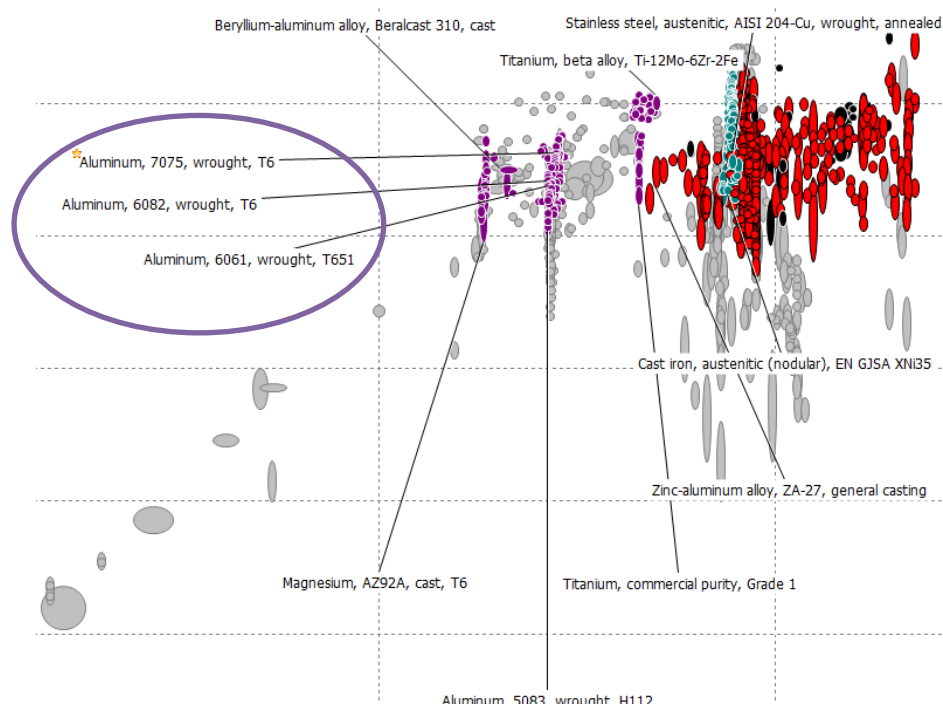


Figura 88. Aleaciones con las mejores cualidades preseleccionadas. Límites elásticos superiores a 270 MPa, baja densidad, precio, buen comportamiento a elevadas temperaturas y frente al agua.

4.3 Caracterización del material base de las boquillas

Los materiales seleccionados fueron caracterizados y comparados sus resultados con los marcados por la bibliografía [97] y la normativa UNE - EN 755-2 [101].

4.3.1 AA 6082 - T6

Se trata de una aleación que posee como principales componentes Al – Mg – Si, con un tratamiento T6. Esta aleación fue suministrada por SERTU S.A. El tratamiento térmico T6, persigue inducir la formación de precipitados en el límite de grano y en su matriz mejorando las propiedades mecánicas de la aleación. La composición química proporcionada por el fabricante está dentro de lo establecido por la normativa UNE – EN 573 - 3 [100] (Tabla IX).

Tabla IX. AA 6082. Composición química fijada por la normativa y garantizada por el fabricante.

% Mg	% Cu	% Si	% Mn
0.6 - 1.2	0.10 máx.	0.7 - 1.3	0.4 - 1.0
% Cr	% Ti	% Fe	% Zn
0.25 máx.	0.10 máx.	0.50 máx.	0.20 máx.

De acuerdo a la bibliografía, es posible conocer las propiedades mecánicas mínimas que ha de tener una determinada aleación. Este valor viene recogido en la normativa UNE – EN 755 - 2 [101]. La Tabla X resume estos valores mínimos de las propiedades mecánicas básicas a temperatura ambiente recogidas en la normativa.

Tabla X. Valores mínimos de las propiedades mecánicas para barras de 150 - 200mm de AA 6082 - T6 [101].

Límite elástico	240 MPa
Resistencia	280 MPa
Alargamiento total	6 %
Dureza	95 HB

Por otro lado, los datos de resistencia que aporta el fabricante son: 270 MPa de límite elástico, 310 MPa de resistencia, ambos dentro de lo especificado por la normativa.

4.3.1.1 Caracterización metalográfica

A continuación, se muestran varias imágenes de microscopía óptica (Figura 89) del material primario AA 6082 - T6 elegido, tanto en orientación longitudinal como transversal, a varios aumentos. En estas micrografías de la AA atacada se observa la

estructura del tamaño de grano y la presencia de finos precipitados tanto en límite de grano como en la matriz.

El material de partida son barras extruidas las cuales, posteriormente, han sido sometidas al tratamiento térmico T6. Por esta razón, puede observarse una clara direccionalidad de grano en las micrografías. Las figuras a y b, muestran el corte longitudinal de la barra en dirección de la extrusión y, por ello, se observan granos alargados. Sin embargo, las figuras c y d, muestran un corte transversal a la dirección de extrusión, un corte transversal de la barra, lo que hace que se observe un tamaño de grano más pequeño. Asimismo, se observan los precipitados negros endurecedores generados mediante el tratamiento térmico T6. En el 4.3.3, se realiza una discusión comparativa de las metalografías de las aleaciones seleccionadas en base a sus diagramas de fase.

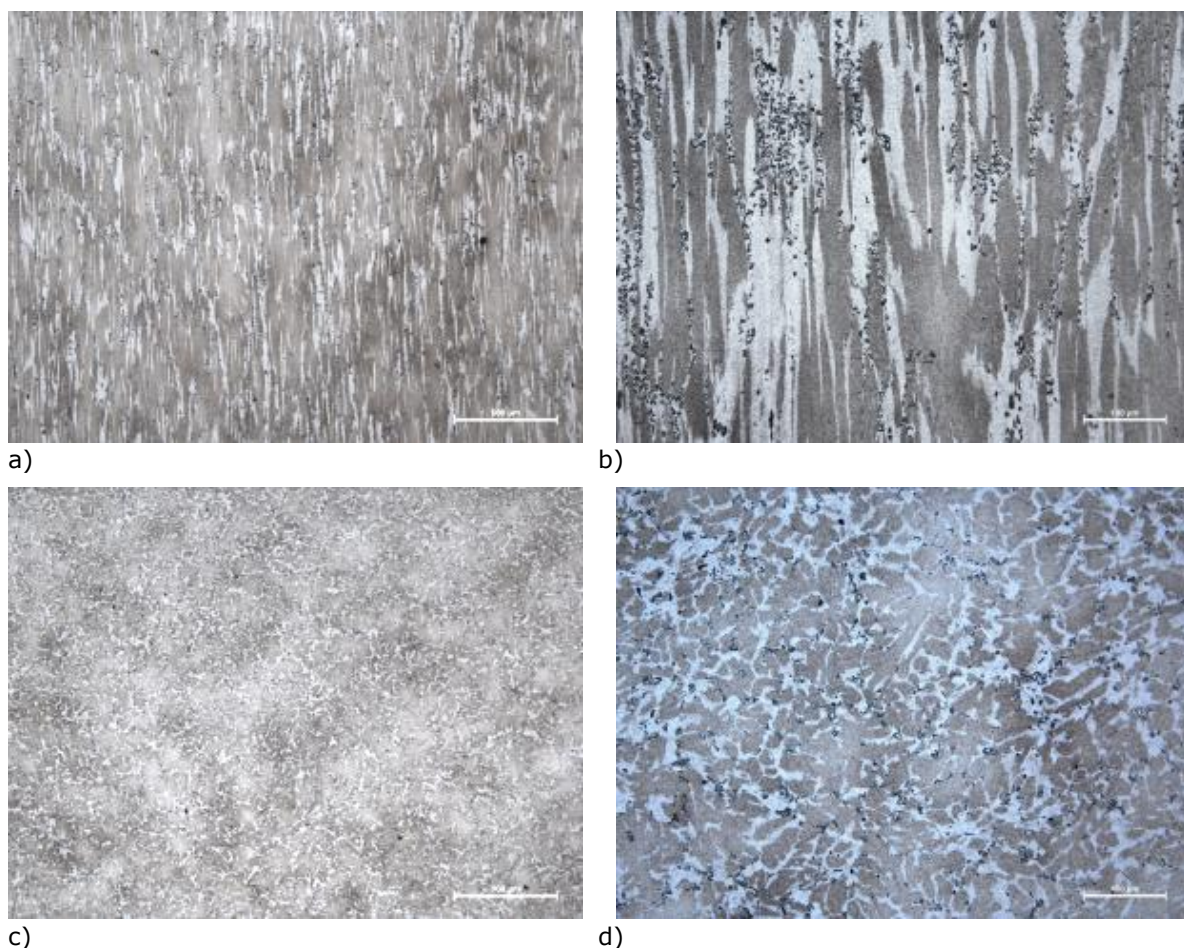


Figura 89. Micrografía del material primario AA 6082 - T6. a) MO plano longitudinal de la barra de aluminio 50x. b) MO plano longitudinal del material 200x. c) MO plano transversal de la barra de aluminio 50x. d) MO plano transversal del material a 200x.

4.3.1.2 Determinación de las propiedades mecánicas

Para la determinación de las propiedades mecánicas de la barra de Al, de la cual se fabricaron las boquillas, se mecanizaron una serie de probetas según indica la norma ASTM (American Society of Testing Materials) [108] en la dirección longitudinal y

transversal de la barra de origen de 200 mm, disponible para estudiar la posible direccionalidad de grano.

Antes de realizar los ensayos de tracción, se realizó un control dimensional de las probetas fabricadas (Tabla XI y Tabla XII). Estos valores no son importantes sólo como control de calidad y para comprobar si las probetas presentan las dimensiones que marca la normativa [108], si no para realizar los cálculos pertinentes de las propiedades mecánicas de la aleación. Con los valores obtenidos en el ensayo universal de tracción, es decir los valores finales de longitud, diámetro y la fuerza aplicada por la máquina de tracción, se obtienen los resultados recopilados en la Tabla XIII y Tabla XIV.

En estos resultados, en general, los valores de las propiedades mecánicas obtenidos en las probetas longitudinales son superiores a los obtenidos en las probetas transversales. Esto se debe a la diferencia del tamaño y morfología del grano en función de la orientación. La probeta extraída de forma longitudinal a la barra, en la superficie de rotura (perpendicular a la misma) el tamaño de grano es pequeño, tal y como se mostraba en las imágenes transversales del MO de la barra de material, lo que dificulta la propagación de la grieta. Esto hace que estas probetas presenten mayores valores de límite elástico, resistencia máxima, alargamiento y estricción.

Sin embargo, en las probetas transversales a la barra, la superficie de rotura se desarrolla a través de los granos de mayor tamaño, pudiéndose propagar la grieta de rotura con una mayor facilidad, y, por ello, presentan un menor límite elástico, una menor resistencia, alargamiento y estricción.

Por regla general, los valores de resistencia longitudinales están muy por encima de los exigidos por la normativa, mientras que los transversales están ligeramente por encima. A elevadas temperaturas esto no se reproduce. Se puede apreciar cómo los valores de límite elástico, alargamiento unitario y resistencia máxima disminuyen independientemente de la direccionalidad por debajo de lo marcado en la normativa a T_{amb} . Y, a su vez, puede apreciarse cómo los valores de alargamiento total y estricción aumentan con la temperatura, al aumentar la plasticidad del material. Este último efecto se aprecia claramente en las probetas longitudinales, las cuales presentan una mayor estricción y un mayor alargamiento hasta la rotura, mientras que, en las transversales, la rotura ocurre mucho antes y el material no se deforma tanto.

A continuación, se muestran las tablas de control dimensional de las probetas (Tabla XI y Tabla XII) y los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos tanto de las probetas de orientación longitudinal (Tabla XIII) como transversal (Tabla XIV) a T_{amb} y de emergencia. En las tablas se han indicado los resultados con las cifras significativas que corresponden a incertidumbres relativas inferiores al 1%.

Tabla XI. Control dimensional de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6.

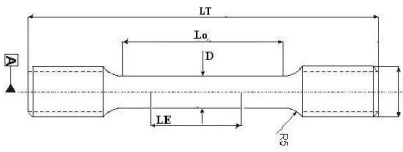
				
Probeta	L_T / mm	L_0 / mm	L_E / mm	D / mm
L1				6.282
	56.000	32.134	25.023	6.266
	55.980	31.958	25.027	6.268
Promedio	55.990	32.046	25.025	6.272
L2				6.266
	56.000	32.008	25.049	6.258
	56.020	32.046	25.054	6.254
Promedio	56.010	32.027	25.052	6.259
L3				6.266
	56.000	32.008	25.049	6.258
	56.020	32.046	25.054	6.254
Promedio	56.010	32.027	25.052	6.259
L4				6.263
	56.000	31.887	25.229	6.255
	55.980	31.960	25.224	6.269
Promedio	55.990	31.924	25.227	6.262
L5				6.267
	56.000	32.140	25.312	6.261
	55.980	31.871	25.308	6.261
Promedio	55.990	32.006	25.310	6.263
L6				6.256
	56.000	31.877	25.203	6.240
	56.000	32.082	25.209	6.243
Promedio	56.000	31.980	25.206	6.246

Tabla XII. Control dimensional de las probetas transversales de AA 6082 - T6.

Probeta	L_T / mm	L_0 / mm	L_E / mm	D / mm
T1				6.296
	56.000	31.308	25.200	6.289
	56.020	31.916	25.202	6.289
Promedio	56.010	31.612	25.201	6.291
T2				6.299
	56.000	31.748	25.180	6.282
	56.040	32.095	25.185	6.274
Promedio	56.020	31.922	25.183	6.285
T3				6.272
	56.020	32.088	25.035	6.261
	56.040	31.899	25.043	6.261
Promedio	56.030	31.994	25.039	6.265
T4				6.268
	55.980	32.135	25.123	6.256
	56.000	32.030	25.121	6.254
Promedio	55.990	32.083	25.122	6.259
T5				6.273
	55.860	31.935	25.106	6.277
	55.880	31.134	25.106	6.286
Promedio	55.870	31.535	25.106	6.279
T6				6.282
	55.980	32.095	25.117	6.274
	55.980	32.139	25.115	6.269
Promedio	55.980	32.117	25.116	6.275

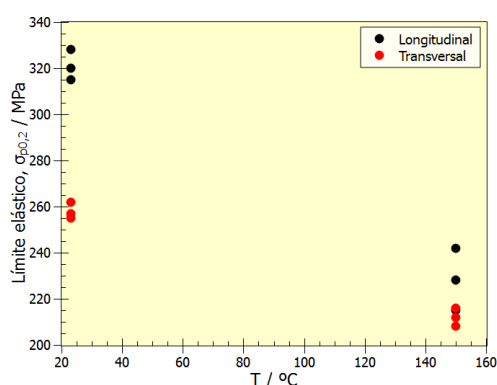
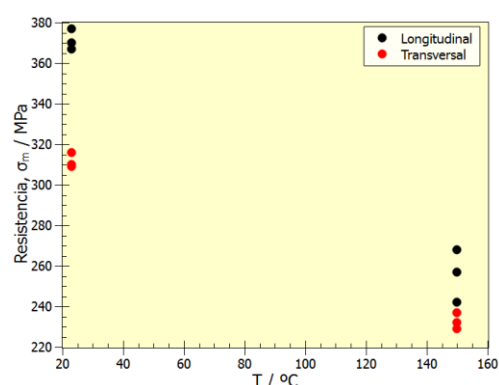
Tabla XIII. Resultados de los ensayos de tracción de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6.

Probeta	T / °C	$\sigma_{p0.2}$ / MPa	ϵ_u %	σ_m / MPa	ϵ_t %	Z %
L1	25.0	328	10	377	15	33
L2	25.0	320	9	370	15	34
L3	25.0	315	9	367	15	33
L4	150.0	215	5	242	18	45
L5	150.0	242	5	268	16	44
L6	150.0	228	5	257	21	45

Tabla XIV. Resultados de los ensayos de tracción de las probetas transversales AA 6082 - T6.

Probeta	T / °C	$\sigma_{p0.2}$ / MPa	ϵ_u %	σ_m / MPa	ϵ_t %	Z %
T1	25.0	257	9	316	12	23
T2	25.0	255	8	310	10	13
T3	25.0	262	8	309	11	23
T4	150.0	208	4	229	10	17
T5	150.0	212	4	232	13	17
T6	150.0	216	4	237	10	10

En los siguientes gráficos, se representan los valores mostrados en la Tabla XIII y la Tabla XIV, lo que permite realizar un estudio comparativo entre los resultados obtenidos a T_{amb} longitudinales y transversales y los ensayos a T de emergencia (150 °C) en las direcciones longitudinales y transversales. Cada una de las gráficas que se presentan a continuación muestran los valores medidos de propiedades mecánicas como: el límite elástico (Figura 90), la resistencia máxima (Figura 91), el alargamiento unitario (Figura 92), total (Figura 93) y la estricción (Figura 94). Destacar que en los siguientes gráficos no se han representado las barras de error al estar incluidas dentro de los puntos asignados.

**Figura 90.** Influencia de la temperatura y de la orientación del grano en el límite elástico de la AA 6082 - T6.**Figura 91.** Influencia de la temperatura y de la orientación del grano en la resistencia máxima de la AA 6082 - T6.

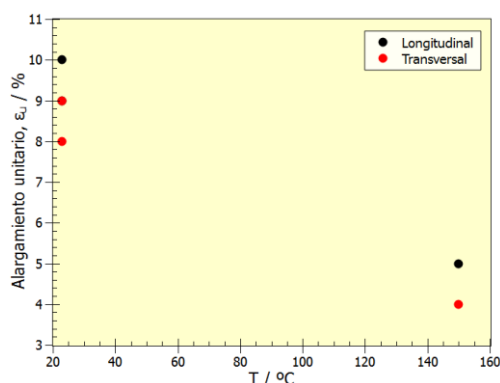


Figura 92. Influencia de la temperatura y de la orientación del grano en el alargamiento unitario de la AA 6082 - T6.

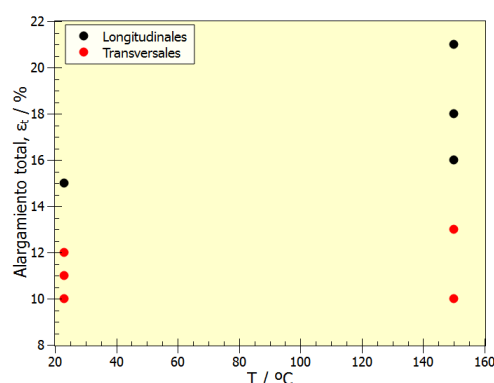


Figura 93. Influencia de la temperatura y de la orientación del grano en el alargamiento total de la AA 6082 - T6.

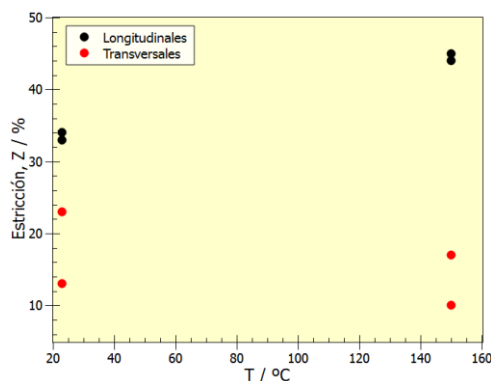


Figura 94. Variación de la estricción en función de la temperatura y de la orientación del grano de la AA 6082 - T6.

Como puede observarse en la Figura 106, el límite elástico está influenciado por la temperatura y la dirección de la probeta. En las probetas longitudinales, el límite elástico está por encima del valor reglamentario, mientras que, en las transversales, está ligeramente por encima. Al elevar la temperatura en ambas probetas este límite elástico cae por debajo de los valores normados a T_{amb} , así como por debajo de los 270 MPa de diseño, por lo que no sería seguro exponer a unas boquillas fabricadas con este material a elevadas temperaturas.

En cuanto a la resistencia máxima (Figura 107), las probetas se comportan de manera similar al caso anterior. La dirección longitudinal, debido a su menor tamaño de grano, presenta mayores valores de resistencia que en la dirección transversal, ambos por encima del fijado por la normativa.

Asimismo, la deformación experimentada por la probeta en el punto de máxima resistencia (alargamiento unitario Figura 108), es ligeramente superior en las probetas longitudinales. Al presentar una mayor capacidad de carga, éstas se deforman en mayor medida hasta alcanzar esta resistencia máxima. Este hecho se ve afectado por la temperatura, disminuyéndolo a la mitad y acercando estos valores entre sí independientemente de la dirección.

Atendiendo al alargamiento total (Figura 109), como en los casos anteriores, en las probetas longitudinales es superior a la de las probetas transversales. Pero, sin embargo, al elevar la temperatura, el alargamiento total de las probetas longitudinales aumenta, mientras que en las probetas transversales estos valores apenas varían. A dicha temperatura en ambas probetas la resistencia máxima se alcanza a un valor de deformación menor, pero, sin embargo, la rotura de las mismas no sigue la misma dinámica, las transversales presentan un alargamiento menor que las longitudinales debido a la disposición granular comentada con anterioridad, y por ende, presentan una ductilidad menor.

Y por último, la estricción (Figura 110) presenta un comportamiento similar al del alargamiento total. Las probetas longitudinales a T_{amb} presentan mayores valores de estricción y al aumentar la temperatura en las probetas longitudinales este valor aumenta, sin embargo, en las probetas transversales tiende a mantenerse o incluso disminuir ligeramente. Este fenómeno es debido a la estructura granular de la probetas, el menor tamaño de grano de las probetas longitudinales permite que éstas se deformen en mayor medida antes de la rotura de la probeta.

En los ensayos realizados a mayor temperatura, se observa como el incremento de la ductilidad de la aleación produce que la diferencia entre las propiedades mecánicas asociadas a la direccionalidad del grano sean menores.

4.3.1.3 *Análisis fractográfico*

Además, y para completar el estudio del comportamiento mecánico de la aleación, se realizó el estudio metalográfico de las superficies de rotura de las probetas. Como se puede observar en las macrografías de la fractura de las probetas de los ensayos realizados (ver Figura 95 y Figura 96), existe una estricción previa a la rotura dúctil del material, donde se aprecia una morfología copa – cono, asociada con la presencia de precipitados endurecedores en el límite de grano. En función de cómo ha evolucionado la grieta perpendicular al eje de aplicación de la carga estática, se observa una clara figura copa-cono o bien una rotura en un ángulo de 45° debido a la deformación por cizalladura.

Estas macrografías de las probetas (transversales o longitudinales, ver Figura 95 y Figura 96, respectivamente) son concordantes con los datos obtenidos en los ensayos mecánicos (Figura 92) y con la metalografía del material base (Figura 89) mostrando una mayor estricción las probetas longitudinal que las transversal, siendo este efecto más visible en las probetas ensayadas a mayores temperaturas. Este comportamiento está asociado con la presencia de un tamaño y morfología de grano que facilita su deformación plástica.

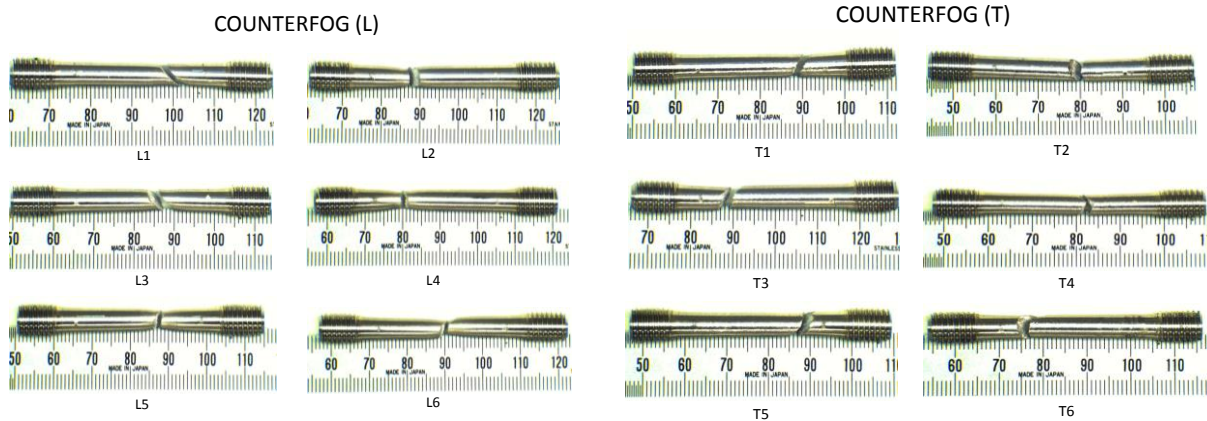


Figura 95. Macrografía de la rotura de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6.

Figura 96. Macrografía de la rotura de las probetas transversales de AA 6082 - T6.

El objeto de este estudio es predecir el comportamiento de la boquilla en el caso de se produzca una grieta y poder establecer un mantenimiento predictivo de las boquillas, es decir, cuando la aparición de una grieta (tamaño, localización, etc.) en el producto final exigirá la sustitución de la boquilla. El análisis de la superficie de rotura y cómo se produjo el crecimiento de grieta, es decir, el proceso de fractura y su comparación en función de la orientación del grano y de la temperatura de trabajo permitió obtener, mediante el análisis comparativo con la metalografía del material base, las observaciones y conclusiones siguientes:

Se ha verificado que el material base posee una clara orientación de los granos en función de la dirección de procesamiento (como se demostró en el apartado 4.3.1.1), lo que justificará la distinta deformación observada en cada una de las probetas y el proceso de crecimiento de grieta.

Para el estudio microscópico de la superficie de rotura, indicar que como en el caso anterior, las probetas se designaran en función de su orientación respecto de la dirección de extrusión. En el caso de las probetas ensayadas a T_{amb} se observa que con independencia de su orientación (transversales o longitudinales, ver Figura 97 y Figura 98, respectivamente) presentan una superficie de rotura característica de fractura dúctil, donde se constata la existencia de microcavidades en forma de pompa de jabón, así como un aspecto fibroso e irregular [125-127]. A mayores aumentos, en ambos casos, se observa la existencia de una morfología copa - cono, claramente asociada a la presencia de precipitados endurecedores que impiden una deformación más plástica del grano produciéndose un crecimiento de grieta intergranular. El comportamiento de las probetas está en concordancia con el estudio metalográfico del material base realizado (ver apartado 4.3.1.1), ya que se observa claramente la direccionalidad y tamaño de grano en las cavidades generadas en la rotura.

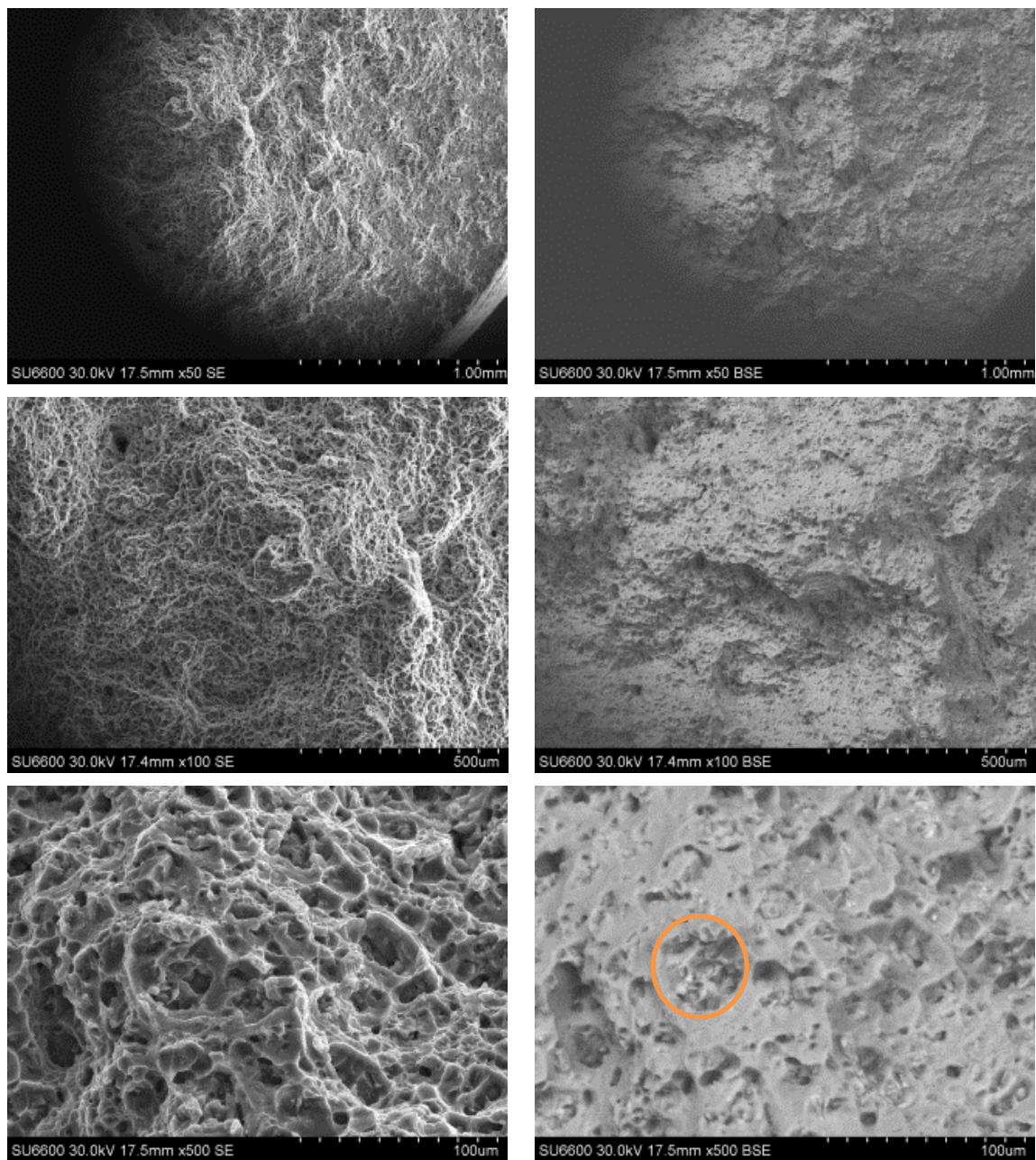


Figura 97. Fractografía de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6 a 25 °C.

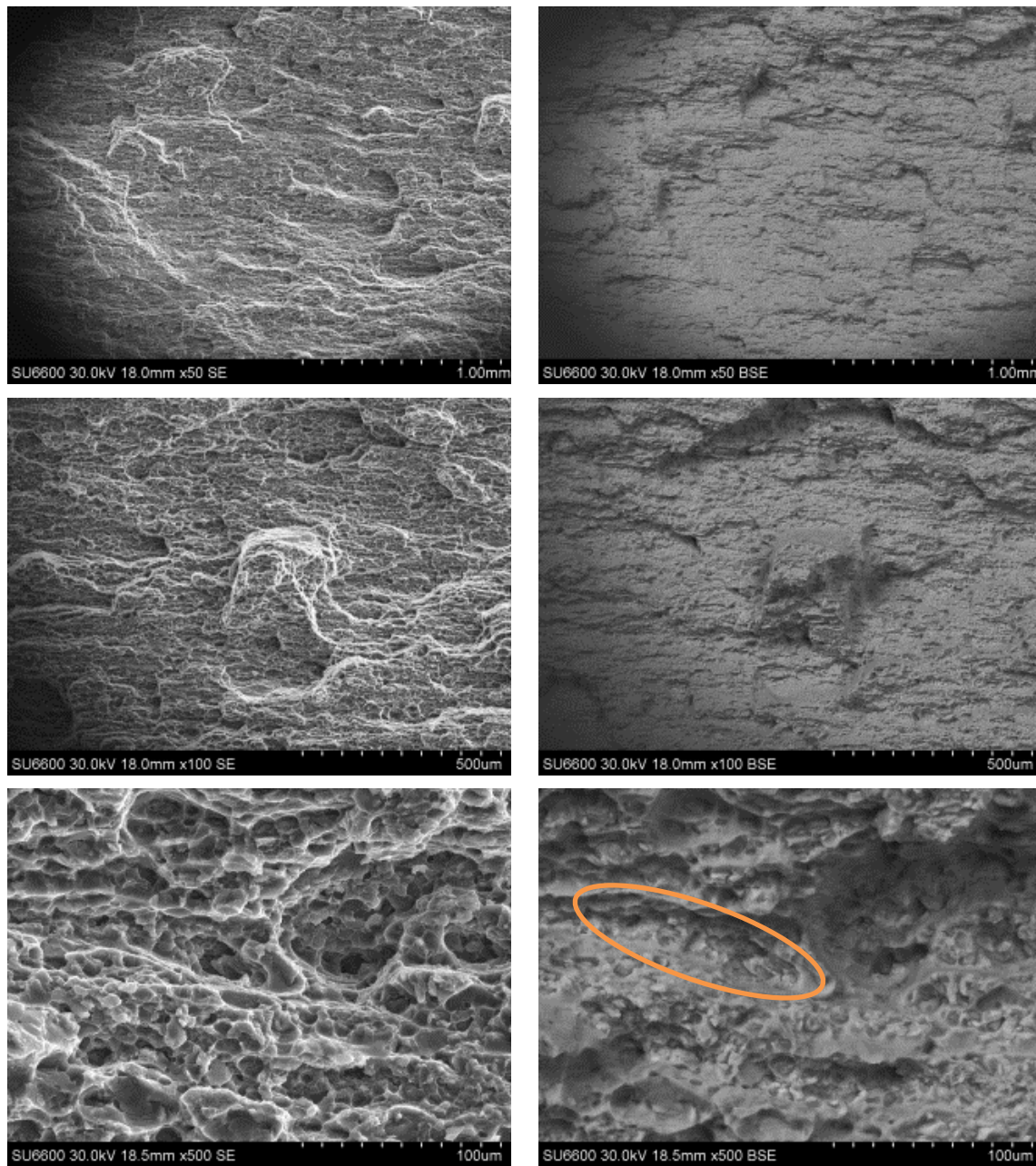


Figura 98. Fractografía de las probetas transversales de AA 6082 - T6 a 25 °C.

Cuando se estudian las superficies de rotura de las probetas ensayadas a temperaturas elevadas mediante un estudio comparativo con lo obtenido a T_{amb} , es decir, se estudia cuál será el comportamiento de los materiales en situaciones de emergencia, se demuestra que las fractografías de los ensayos realizados $T^a = 150\text{ °C}$ presentan una morfología concordante con las de T_{amb} discutidas con anterioridad. Las diferencias observadas entre las probetas en función de la orientación de grano persisten, observándose unas copas deformadas de mayor tamaño en las probetas transversales (ver resultados de las fractografías transversales y longitudinales a T de emergencia, Figura 99 y Figura 100, respectivamente).

Para analizar las posibles diferencias de comportamiento microscópico se compararon dichas fractografías (Figura 99 y Figura 100) con las de T_{amb} (ver Figura 97

y Figura 98), observándose la mayor ductilidad del material, los pliegues formados por la deformación del grano muestran espesores menores – zonas blanquecinas de las micrografías a mayores aumentos, lo que demuestra el mayor comportamiento dúctil ya cuantificado en los ensayos mecánicos realizados (Figura 92). Esta mayor ductilidad del material es concordante con la mayor profundidad de la estructura copa – cono observada en la fractura y producida por procesos de coalescencia de las porosidades generadas por deformación plástica del límite de grano y la presencia de un precipitado endurecedor en el progreso de la grieta a través del límite de grano, es decir, fractura intergranular.

La caracterización de las superficies de rotura de rotura mediante SEM-EDX, como era de esperar, no permitió revelar la presencia de las fases endurecedoras. A continuación, y a modo de ejemplo, se presentan las zonas de análisis barridas a distintos aumentos y los resultados obtenidos mediante el analizador (ver Figura 101, Figura 102, Figura 103 y Figura 104).

Los resultados obtenidos son concordantes con las propias limitaciones de la propia técnica utilizada, dado que su sensibilidad exige concentraciones superiores al 5 %p, a lo que habría que restar el efecto matriz. A partir de estos valores es imposible discernir la variación de composición en esas zonas donde se localizarían las fases endurecedoras precipitadas. Si bien la morfología de la superficie de fractura con zonas copa – cono es generada por la presencia de precipitados de mayor resistencia a la tracción que la matriz de grano, el tamaño de estas fases es tan pequeño que el propio efecto de la matriz impide su análisis mediante esta técnica. Sin embargo, es importante remarcar que los resultados obtenidos de la caracterización metalográfica permiten confirmar la homogeneidad del material y el comportamiento del material base esperado y descrito por la norma. Hecho que demostraría la calidad del material para su utilización.

Por último, indicar que en la realización de este trabajo de investigación, no se consideró necesaria la caracterización de las fases precipitadas mediante otras técnicas de caracterización (STEM – WDX, TEM o mediante la utilización de réplicas), dada la gran cantidad de estudios existentes en la bibliografía y que no es uno de los objetivos del trabajo.

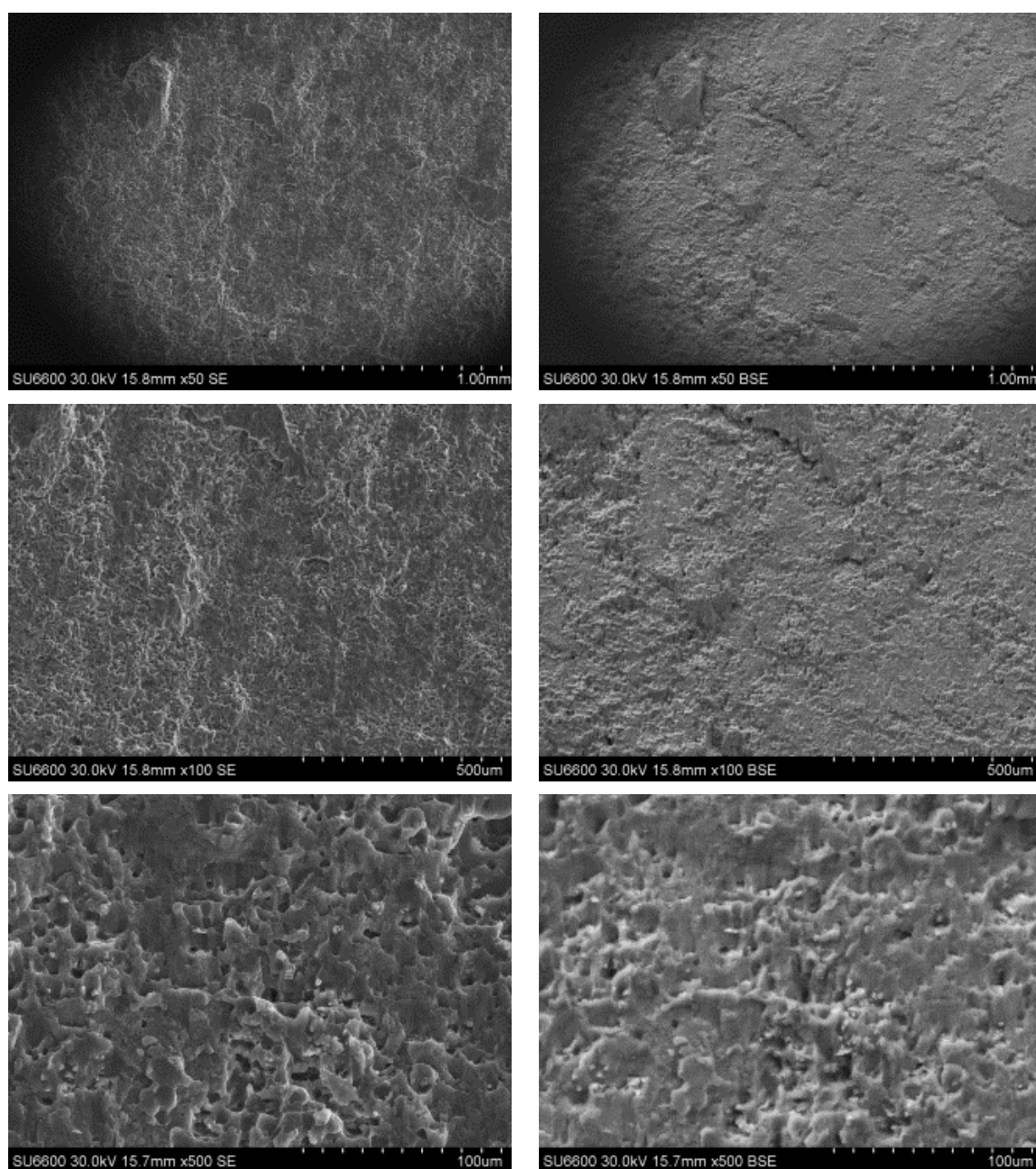


Figura 99. Fractografía de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6 a 150 °C.

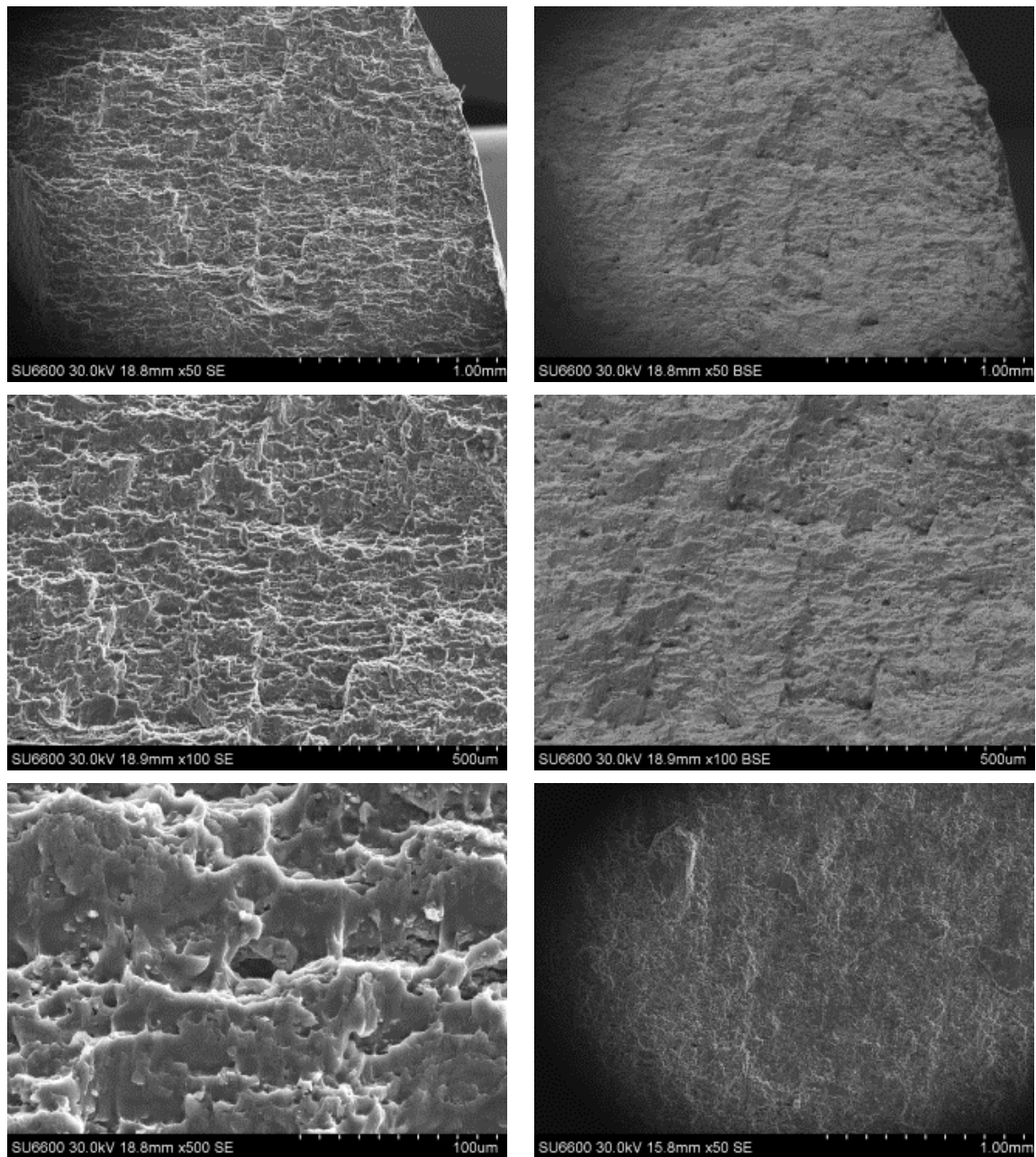


Figura 100. Fractografía de las probetas transversales de AA 6082 - T6 a 150 °C.

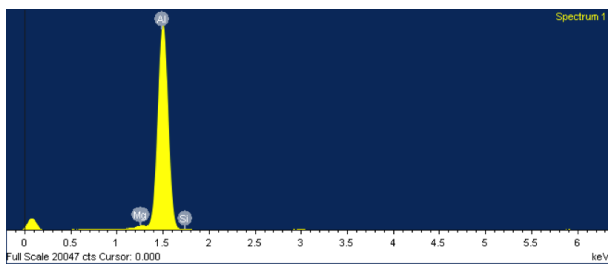
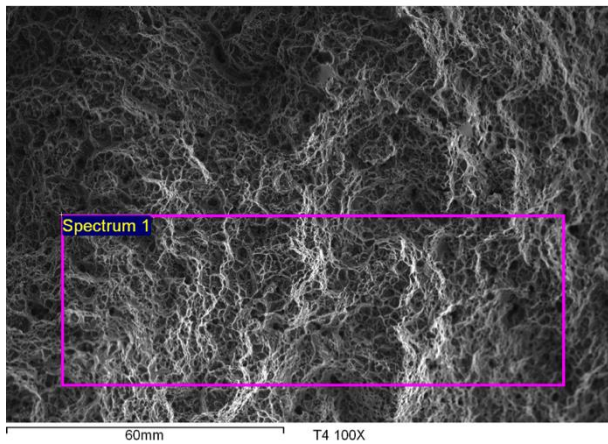


Figura 101. SEM-EDX de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6 a 25 °C.

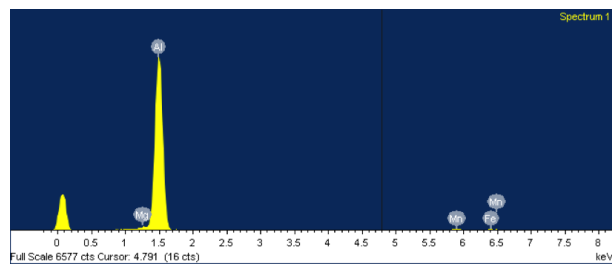
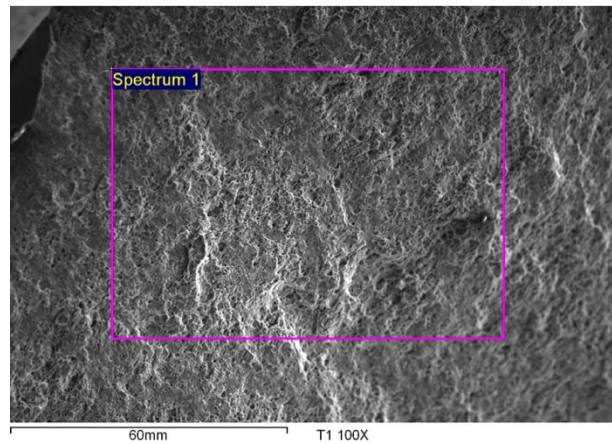


Figura 102. SEM-EDX de las probetas longitudinales de AA 6082 - T6 a 150 °C.

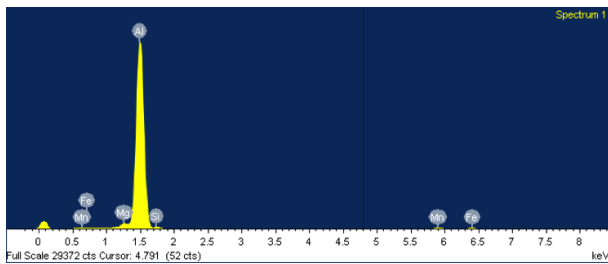
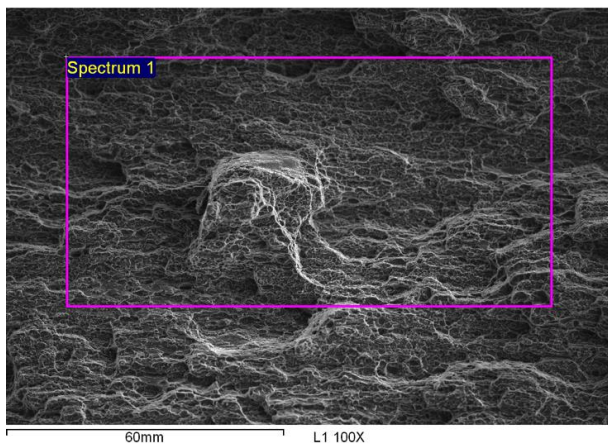


Figura 103. SEM-EDX de las probetas transversales de AA 6082 - T6 a 25 °C.

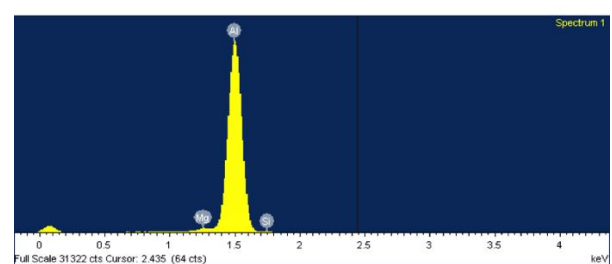
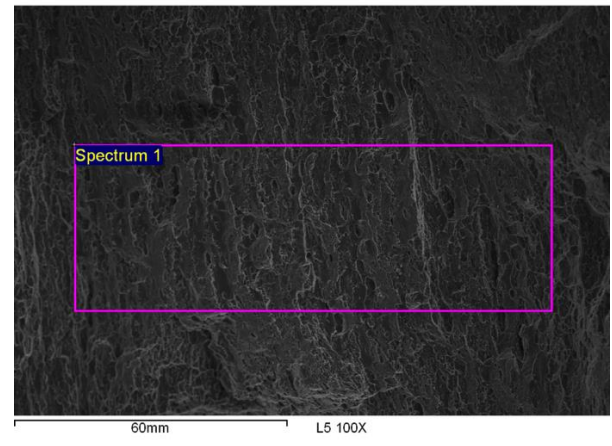


Figura 104. SEM-EDX de las probetas transversales de AA 6082 - T6 a 150 °C.

4.3.2 AA 7075 - T6

El segundo material seleccionado para la fabricación de las boquillas es el AA 7075 - T6. Esta selección se basó en las buenas propiedades mecánicas de este material. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la caracterización de la AA 6082 - T6, se necesitaba un material con mejores propiedades mecánicas a T de emergencia. Se espera que dichas temperaturas sean de alrededor de 150 °C y se exige que el material mantenga su límite elástico por encima de 270 MPa. Para comprobar este hecho se realizaron como en el caso anterior, los ensayos de tracción pertinentes.

En este caso, la AA 7075-T6 fue adquirida a través de la empresa ALU - STOCK. La composición química de la misma se muestra en la siguiente tabla (Tabla XV). Estos valores están dentro de los valores establecidos por la normativa UNE -EN 573 - 3 [100].

Tabla XV. AA 7075. Composición química dada por el fabricante.

D _{barra}	% Zn	% Mg	% Cu	% Fe	% Cr	% Si	% Ti	% Mn	% otros
100 mm	5.790	2.360	1.160	0.190	0.180	0.100	0.030	0.030	
55 mm	5.750	2.390	1.360	0.200	0.210	0.080	0.072	0.170	Zn 0.005
30 mm	5.860	2.340	1.390	0.230	0.210	0.090	0.043	0.180	Zn 0.027
16 mm	5.289	2.442	1.545	0.227	0.196	0.074	0.063	0.060	Ni 0.009 Pb 0.008 Sn 0.002

El valor de las propiedades mecánicas mínimas que ha de tener una determinada aleación viene recogido en la UNE - EN 755 - 2 [101]. En este caso se adquirieron barras de diferentes diámetros para facilitar el mecanizado de las diferentes piezas escaladas de las boquillas. La Tabla XVI resume estos valores mínimos de las propiedades mecánicas básicas a temperatura ambiente de la AA 7075 - T6.

Tabla XVI. Valores mínimos de las principales propiedades mecánicas en función del diámetro de la barra recogidos en la normativa UNE - EN 755 - 2 [101] de la AA 7075 - T6.

Diámetro barra	25 < D ≤ 100 mm	16 mm
Límite elástico	500 MPa	480 MPa
Resistencia	560 MPa	540 MPa
Alargamiento total	7 %	7 %
Dureza	150 HB	150 HB

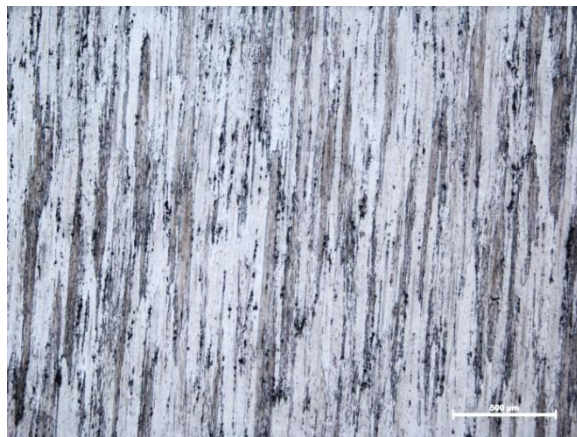
El fabricante nos proporcionó los siguientes valores reales de resistencia y límite de elasticidad de las barras adquiridas (Tabla XVII). Estos valores están por encima de los exigidos por la normativa y por encima de las solicitaciones mecánicas de diseño.

Tabla XVII. Características mecánicas dadas por el fabricante. AA 7075 - T6.

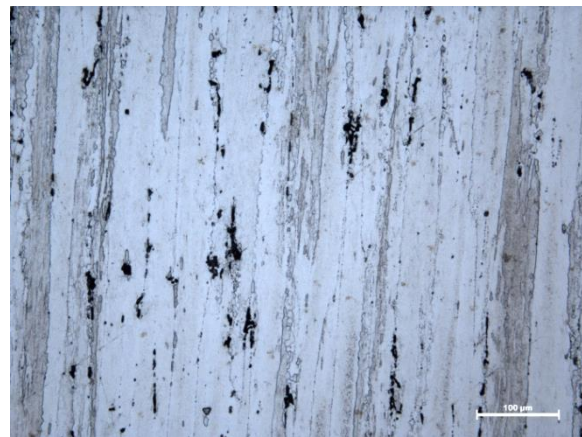
Diámetro barra	100 mm	55 mm	30 mm	16 mm
Límite elástico	581 MPa	552 MPa	585 MPa	618 MPa
Resistencia	633 MPa	630 MPa	624 MPa	664 MPa
Alargamiento total	11.7 %	7.4 %	7.8 %	9.1 %
Dureza		168 HB	165 HB	

4.3.2.1 Caracterización metalográfica

El estudio metalográfico del material base AA 7075 - T6 (Figura 105), siguiendo el mismo procedimiento de selección de muestras anteriormente utilizado, permitió analizar la estructura de grano que presenta el material en función de la dirección de procesado.



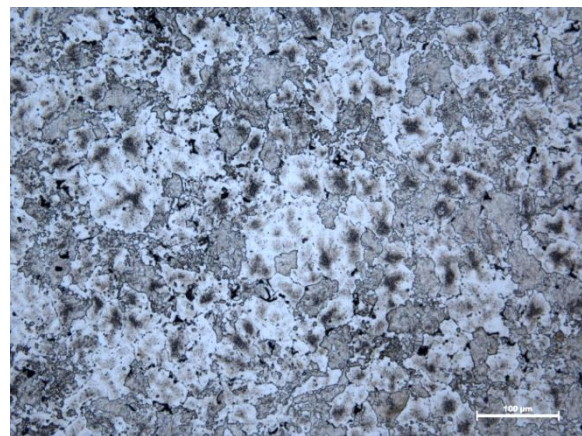
a)



b)



c)



d)

Figura 105. Micrografía del material primario AA 7075 - T6. a) MO plano longitudinal de la barra de aluminio 50x. b) MO plano longitudinal de la barra de aluminio 200x. c) MO plano transversal de la barra de aluminio 50x. d) MO plano transversal de la barra de aluminio 200x.

El estudio comparativo entre la AA 6082 - T6 (Figura 89) y la AA 7075 - T6 (Figura 105) demuestra que ambos materiales han sido sometidos a un proceso de extrusión y posteriormente se las ha sometido a un tratamiento térmico endurecedor T6. El proceso

de extrusión es el responsable de la direccionalidad del grano. Los cortes longitudinales a la dirección de extrusión muestran un tamaño de grano alargado, mientras que el corte transversal a la dirección de extrusión de la barra muestra un grano de menor tamaño. Además, se observan un gran número de precipitados. Se trata de la fase endurecedora precipitada durante el tratamiento térmico T6.

En el 4.3.3, se realiza una discusión comparativa de las metalografías de las aleaciones seleccionadas en base a sus diagramas de fase.

4.3.2.2 *Determinación de las propiedades mecánicas*

Siguiendo con la misma metodología que para la AA 6082 – T6, para la determinación de las propiedades mecánicas se mecanizaron una serie de probetas según indica la norma ASTM [108]. Se mecanizaron probetas de la barra de material de 100 mm de origen tanto longitudinales como transversales para estudiar la posible direccionalidad de grano. Con ello se pretende asegurar que los valores proporcionados por el fabricante son reales y que tanto a T_{amb} como a T de emergencia, el valor del límite elástico se encuentra por encima del de diseño (270 MPa). Es importante recordar que este valor está sobredimensionado, ya que se obtuvo a una presión de trabajo superior a la real (5 MPa) en previsión de posibles pruebas a mayores presiones. Este último requisito no lo cumplía la AA 6082 – T6.

Los controles dimensionales de todas las probetas ensayadas se muestran a continuación (Tabla XVIII y Tabla XIX). Estos controles permitirán calcular las propiedades mecánicas presentadas en la Tabla XX y Tabla XXI.

En estas últimas tablas, se recogen los datos obtenidos de los ensayos a tracción para las probetas longitudinales (Tabla XX) y transversales (Tabla XXI) a T_{amb} y T de emergencia. Se ha elegido la mínima velocidad de deformación para evitar grandes saltos en las curvas tensión - deformación.

Recordar que como en el caso de los resultados de los ensayos mecánicos mostrados con anterioridad para la AA 6082 – T6, en las tablas sucesivas se han indicado las cifras significativas que corresponden a incertidumbres relativas inferiores al 1%.

Tabla XVIII. Control dimensional de las probetas longitudinales de AA 7075 - T6.

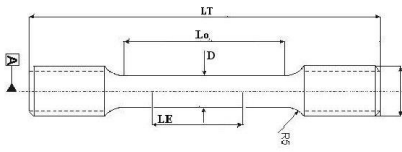
				
Probeta	L_T / mm	L_0 / mm	L_E / mm	D / mm
L1				6.283
	56.060	32.416	24.925	6.284
	56.080		24.929	6.293
Promedio	56.070	32.416	24.927	6.287
L2				6.276
	56.100	32.069	25.298	6.280
	56.100		25.290	6.291
Promedio	56.100	32.069	25.294	6.282
L3				6.292
	56.020	32.009	25.099	6.286
	56.040		25.092	6.284
Promedio	56.030	32.009	25.096	6.287
L4				6.282
	55.980	32.059	25.227	6.290
	55.980		25.229	6.298
Promedio	55.980	32.059	25.228	6.290
L5				6.279
	55.940	31.911	24.779	6.284
	55.940		24.789	6.294
Promedio	55.940	31.911	24.784	6.286
L6				6.294
	56.060	32.111	24.897	6.290
	56.060		24.888	6.285
Promedio	56.060	32.111	24.893	6.290
L7				6.273
	55.780	32.080	25.147	6.273
	55.780		25.151	6.274
Promedio	55.780	32.080	25.149	6.273
L8				6.276
	56.020	32.050	25.042	6.276
	56.040		25.039	6.287
Promedio	56.030	32.050	25.041	6.280
L9				6.268
	55.940	31.944	25.007	6.272
	55.940		25.008	6.285
Promedio	55.940	31.944	25.008	6.275

Tabla XIX. Control dimensional probetas transversales AA 7075 - T6.

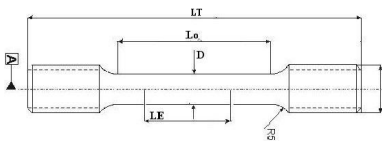
					
Probeta	L _T / mm	L ₀ / mm	L _E / mm	D / mm	
T1				6.275	
	56.000	32.073	25.537	6.276	
	56.000		25.534	6.288	
Promedio	56.000	32.073	25.536	6.280	
T2				6.289	
	56.020	32.125	25.119	6.280	
	56.040		25.126	6.278	
Promedio	56.030	32.125	25.123	6.282	
T3				6.276	
	56.000	32.467	24.987	6.285	
	56.020		24.989	6.288	
Promedio	56.010	32.467	24.988	6.283	
T4				6.264	
	56.000	31.959	25.167	6.255	
	56.000		25.165	6.258	
Promedio	56.000	31.959	25.166	6.259	
T5				6.276	
	55.880	31.855	25.250	6.276	
	55.900		25.255	6.285	
Promedio	55.890	31.855	25.253	6.279	
T6				6.284	
	56.000	31.612	25.169	6.285	
	56.020		25.171	6.286	
Promedio	56.010	31.612	25.170	6.285	
T7				6.283	
	55.960	31.871	25.061	6.276	
	55.980		25.064	6.274	
Promedio	55.970	31.871	25.063	6.278	
T8				6.273	
	55.980	31.981	25.295	6.277	
	55.980		25.294	6.285	
Promedio	55.980	31.981	25.295	6.278	
T9				6.276	
	55.980	32.065	25.101	6.272	
	56.000		25.104	6.271	
Promedio	55.990	32.065	25.103	6.273	

Tabla XX. Resultados ensayos de tracción para las probetas longitudinales AA 7075 - T6.

Probeta	T / °C	$\sigma_{p0.2}$ / MPa	ϵ_u %	σ_m / MPa	ϵ_t %	Z %	Comentarios
L1	25.0	544	8	587	9	18	
L5	25.0	562	8	626	8	23	
L6	25.0	549	9	619	10	26	
L2	150.0	407	5	430	23	56	
L3	150.0	373	3	412	20	58	
L4	150.0	377	2	427	23	57	Rompe hilos rosca
L7	150.0	400	4	425	25	55	Rompe hilos rosca

Tabla XXI. Resultados ensayos de tracción para las probetas transversales AA 7075 - T6.

Probeta	T / °C	$\sigma_{p0.2}$ / MPa	ϵ_u %	σ_m / MPa	ϵ_t %	Z %	Comentarios
T1	25.0	435	8	524	8	11	
T2	25.0	452	7	538	7	16	
T4	25.0	442	6	524	6	12	Rompe en marca
T7	25.0	434	6	524	6	10	Rompe en marca
T8	25.0	452	7	537	8	15	Rompe hilos rosca
T3	150.0	358	3	401	12	34	
T5	150.0	361	4	405	15	32	
T6	150.0	334	3	376	13	21	

En los ensayos mecánicos, las probetas L4 y L7 (ensayadas a altas temperaturas), rompen los hilos de la rosca al ensayarla, por lo que los resultados pueden verse afectados. En concreto, en la L4 se observan valores más bajos de resistencia y alargamiento. Y en L7 se observa un salto en la curva tensión-deformación (Figura 117), posiblemente debido a este hecho.

En cuanto a los ensayos con las probetas transversales, dos de ellas T4 y T7 (ensayadas a T_{amb}), rompen justo por las marcas de control del extensómetro, presentando valores de deformación ligeramente inferiores al resto de probetas. Asimismo, la probeta T8 (ensayada también a bajas temperaturas) rompe como en los casos anteriores en los hilos de la rosca durante el ensayo, pero no afecta a los resultados del ensayo.

Por lo general, todos los valores calculados de límite elástico, resistencia, alargamiento y estricción son mayores en las probetas longitudinales que en las transversales a T_{amb} . Esto es debido, como en el caso anterior, a la superficie por la cual se propaga la grieta. En el caso de las longitudinales, los granos son más pequeños, por lo que oponen una mayor resistencia a la propagación de la grieta; pero en el caso de las transversales ocurre lo contrario. En las transversales los granos son de mayor tamaño y la grieta se propaga más fácilmente.

Comparando los resultados con la normativa, los valores de las propiedades mecánicas de las probetas longitudinales están por encima de los valores normados, mientras que los transversales están ligeramente por debajo de lo establecido. En cualquier caso, la media de los valores están por encima de la normativa. Destacar que los valores proporcionados por el fabricante, en el caso de la barra de 100 mm, son ligeramente superiores a los medidos en el laboratorio. Y a su vez, recordar que todos los valores de resistencia máxima a T_{amb} están muy por encima del valor de diseño.

En cambio, si se consideran los resultados obtenidos a T de emergencia estas relaciones no se mantienen en todas las propiedades. El límite elástico y la resistencia máxima son ligeramente superiores en las probetas longitudinales, pero esta diferencia es mucho menor que a T_{amb} . El alargamiento unitario presentan valores similares en ambos tipos de probeta, habiéndose reducido a la mitad con respecto a T_{amb} . La resistencia máxima a T de emergencia se alcanza a valores de deformación menores que a T_{amb} . Y por último, el alargamiento total y la estricción, aumentan en ambas probetas a T de emergencia con respecto a T_{amb} . Como en el caso de la AA 6082, a T de emergencia, las probetas se deforman en mayor medida antes de su rotura, debido a un aumento en la ductilidad del material a consecuencia de la temperatura.

Siguiendo la misma metodología aplicada en apartados anteriores (para la AA 6082 – T6), a continuación se muestran los gráficos obtenidos en la caracterización mecánica de la AA 7075 – T6. Los valores obtenidos de las curvas de tracción, para su discusión, se muestran en función de la direccionalidad y la temperatura en los siguientes gráficos de límite elástico (Figura 106), resistencia máxima (Figura 107), alargamiento unitario y total (Figura 108 y Figura 109, respectivamente) y estricción final (Figura 110). Incidir que como en el caso de la AA 6082 – T6, en los siguientes gráficos no se han representado las barras de error al estar incluidas dentro de los puntos asignados.

En el caso de la AA 7075 –T6 al igual que en la AA 6082 – T6, el valor obtenido del límite elástico (Figura 106) se encuentra influenciado por la direccionalidad de grano y por la temperatura. En las probetas longitudinales el límite elástico está por encima del valor recogido en la norma, mientras que en las transversales está por debajo del mismo. El valor medio obtenido cumple con los estándares mínimos exigidos en la norma. Al elevar la temperatura, tanto los valores de las probetas longitudinales como los de las transversales caen y la diferencia entre ellos disminuye. El efecto de la temperatura minimiza el de la direccionalidad de grano. El límite elástico a T de emergencia se encuentra por debajo de los normalizados a T_{amb} , pero se sitúa por encima del valor de diseño (270 MPa), condición no asegurada en la aleación anterior. Esta propiedad es muy importante, ya que garantiza el empleo de las boquillas con seguridad en condiciones de temperatura desfavorables.

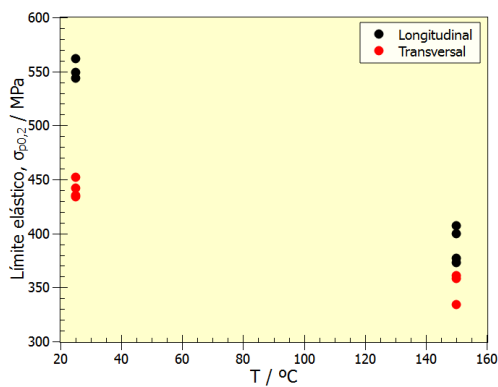


Figura 106. Influencia de la orientación y de la temperatura en el límite elástico de las probetas de AA 7075 - T6.

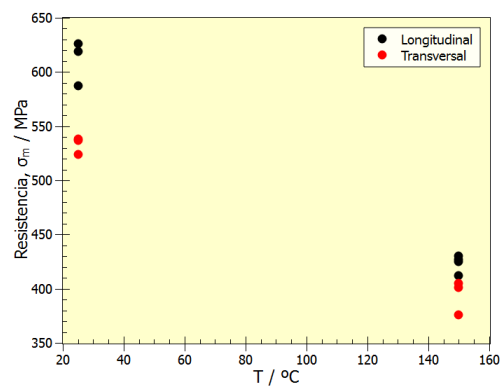


Figura 107. Influencia de la orientación y de la temperatura en la resistencia máxima de las probetas de AA 7075 - T6.

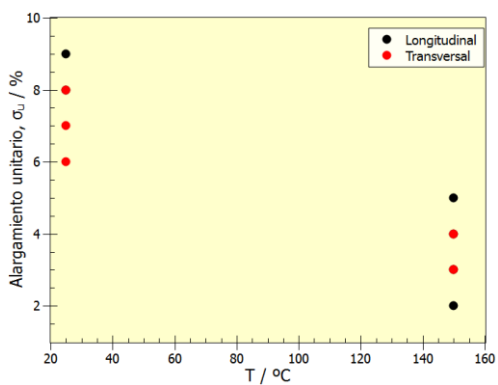


Figura 108. Influencia de la orientación y de la temperatura en el alargamiento unitario de las probetas de AA 7075 - T6.

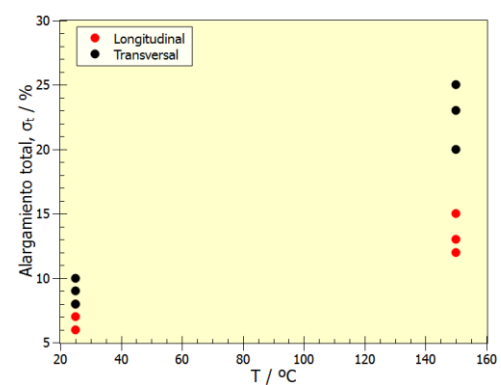


Figura 109. Influencia de la orientación y de la temperatura en el alargamiento total de las probetas de AA 7075 - T6.

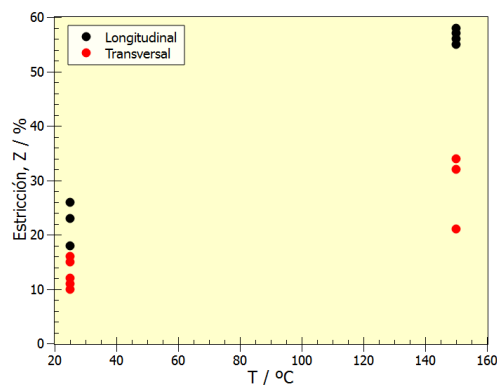


Figura 110. Variación de la estricción en función de la orientación de las probetas y de la temperatura en la AA 7075 - T6.

En cuanto a los valores de resistencia máxima medidos (Figura 107), el comportamiento se asemeja al observado con las medidas del límite elástico. A T_{amb} , debido al menor tamaño de grano las probetas longitudinales presentan una mayor resistencia por encima del valor normalizado, sin embargo, los valores de las probetas transversales son menores y estos están justo en el límite marcado por la normativa. El

aumento de la temperatura disminuye estos valores de resistencia y tiende a aproximarlos.

El alargamiento unitario (Figura 108) sigue una evolución a T_{amb} similar a los casos anteriores, siendo mayor en las probetas longitudinales. Estas probetas soportan una mayor tensión y se deforman en mayor medida antes de alcanzar ese máximo. La temperatura, como en los casos anteriores, reduce este valor y los aproxima. La resistencia máxima a mayores temperaturas se alcanza antes con una menor deformación de las probetas.

Y por último, el alargamiento total (Figura 109) y la estricción (Figura 110) varían de forma inversa a lo comentado en las propiedades mecánicas anteriores. A T_{amb} , los valores de alargamiento total y estricción son ligeramente más elevados en las probetas longitudinales que en las transversales. A T de emergencia este efecto se magnifica. Los valores de las probetas transversales aumentan ligeramente, pero los valores de las probetas longitudinales aumentan en mayor medida, aumentando la diferencia entre las probetas. Esto puede relacionarse de nuevo con el tamaño de grano. Ambas probetas se vuelven más dúctiles por efecto de la temperatura, pero dado el menor tamaño de grano en la dirección de propagación de grieta de las probetas longitudinales, éstas soportan una mayor tensión antes de la rotura después de haber alcanzado el valor máximo de resistencia, por lo que se produce una mayor deformación y una mayor estricción.

Es importante destacar que los resultados obtenidos en estos ensayos están en concordancia con los valores establecidos en la normativa UNE EN 755-2 [101], y son ligeramente inferiores a los dados por el fabricante. Asimismo, los valores de límite elástico están por encima del valor de diseño (270 MPa) incluso a T de emergencia. Esto garantiza la integridad del sistema incluso a T de emergencias.

4.3.2.3 *Análisis fractográfico*

A continuación, se muestran las macrográficas de la rotura de las probetas ensayadas longitudinalmente (Figura 111) y transversalmente (Figura 112). Estas macrográficas de la rotura muestran una rotura dúctil. En todas las probetas macroscópicamente se observa una estricción previa a la rotura, especialmente en las probetas ensayadas a T de emergencia, lo que concuerda con los valores de estricción anteriormente presentados. En la mayoría se aprecia una clara rotura dúctil copa-cono. En algunas de ellas se aprecia un plano de 45° dada la evolución de grieta en el plano de cizalladura, donde la tensión es máxima.

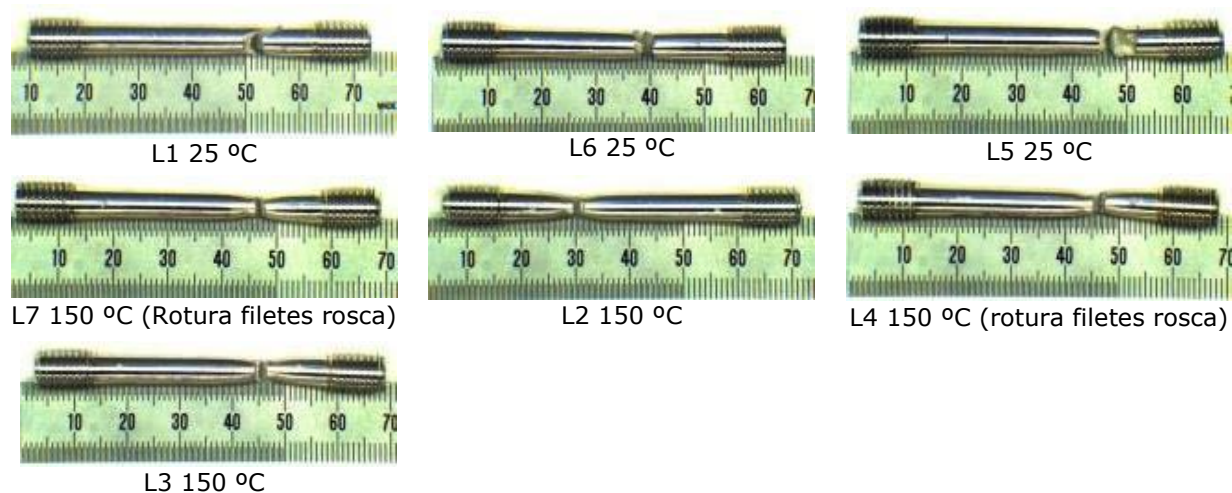


Figura 111. Macrografía de la rotura de las probetas longitudinales de AA 7075 - T6.

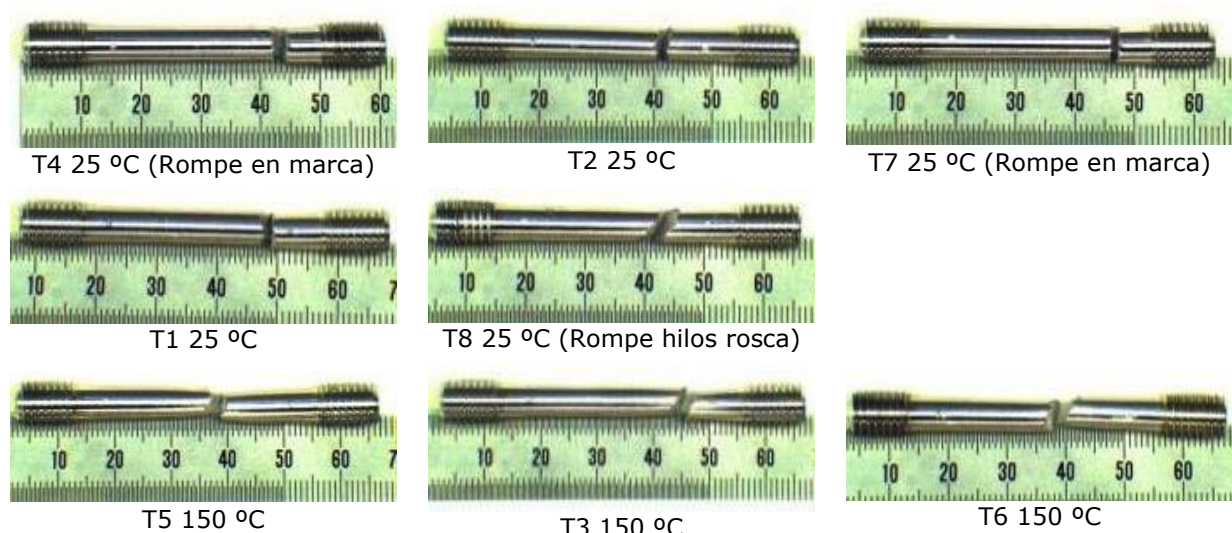


Figura 112. Macrografía de la rotura de las probetas transversales de AA 7075 - T6.

No se consideró necesario el estudio de las probetas en SEM y SEM – EDX dados los resultados obtenidos con la AA 6082 – T6.

4.3.3 Conclusiones parciales - Comparativa de las aleaciones

El estudio comparativo de los resultados obtenidos en la caracterización mecánica y metalográfica de ambas aleaciones (presentado en los apartados anteriores) permitirá seleccionar la aleación más idónea en base a las solicitaciones mecánicas que se le van a exigir a la boquilla en las condiciones ambientales de operación, es decir, la lucha contra el fuego y contra agentes NRBQ.

Es importante remarcar que las propiedades mecánicas determinadas para cada una de las aleaciones son las que se utilizarán como valores base en los distintos modelos mecánicos que se presentan en esta memoria de investigación.

4.3.3.1 Material base

En ambas AA se midió y constató una dependencia de la ductilidad (alargamiento) en función de la orientación del material, es decir, en la dirección de proceso y la presencia de fases precipitadas endurecedoras (generadas mediante tratamiento térmico). Las diferencias entre ambas aleaciones está en su composición.

La AA 6082 está incluida dentro del grupo de AA 6xxx las cuales tienen como aleantes principales el Mg y Si. En nuestro caso, estos aleantes pueden sumar un máximo del 2 %. Si se estudia el diagrama binario y ternario de esta aleación (Figura 113 y Figura 114), se puede afirmar que en la micrografía mostrada con anterioridad (ver Figura 89) se observan en blanco la fase α -Al y en gris Al + Mg_2Si . Además, debido al tratamiento térmico realizado, existen diversos precipitados endurecedores que pueden ser de la fase β - Mg_2Si , así como de otras fases precipitadas endurecedoras homogéneamente dispersas en la matriz y en el límite de grano y con composiciones químicas diversas de FeCrAlSi , AlFeMnSi , etc.

En cambio, la AA 7075 tiene como aleante principal el Zn (5 - 6 %) y con una composición ligeramente inferior de Mg (2 - 3 %) que hace que sea tratable térmicamente. Se pueden formar dos fases provenientes de la descomposición eutéctica de las aleaciones comerciales de Al - Zn -Mg que son: la hexagonal Mg_2Zn y la cúbica centrada en el cuerpo $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$. En el diagrama de la Figura 115, se muestran las diferentes solubilidades de estos aleantes. En las micrografías de esta aleación se pueden observar dispersoides de composición variable (ver Figura 105), son compuestos principalmente de la fase $\text{Al}_{18}\text{Mg}_3\text{Cr}_2$ con presencia de Cu, Zn y Mg. Estas fases son las que otorgan una mayor resistencia a la aleación.

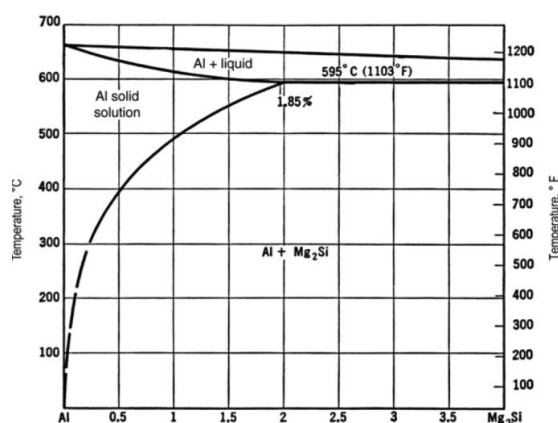


Figura 113. Diagrama de fases Al-Mg-Si [128].

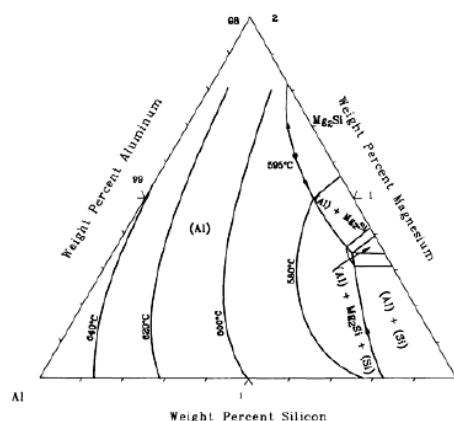


Figura 114. Al-Mg-Si Proyección sólida [128].

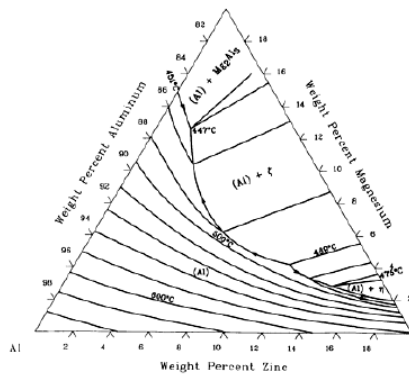


Figura 115. Diagrama de fases ternario Al-Mg-Zn [128].

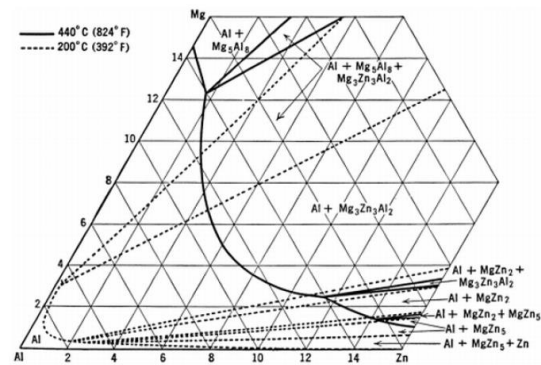


Figura 116. Diagrama de fases ternario Al - Zn - Mg [128] a 400 y 200 °C.

Los tratamientos térmicos de disolución a altas temperaturas, temple y posterior envejecimiento, son muy habituales en las aleaciones de Al - Si - Mg. Sin embargo, las aleaciones de Al - Zn - Mg son las que presentan un mayor grado de endurecimiento por tratamiento térmico de precipitación. Estas aleaciones presentan microsegregaciones de fases de Mg - Zn (Figura 116), y su crecimiento y dispersión hay que controlarlo con el tratamiento térmico que se aplique para evitar que tengan una influencia negativa en sus propiedades. Es por ello, que para ambas aleaciones se ha elegido un tratamiento T6, para poder asegurar las mayores resistencias del material seleccionado.

4.3.3.2 Resultados de los ensayos mecánicos

En estos gráficos comparativos (Figura 117) puede observarse como las propiedades mecánicas del AA 7075 - T6 superan con creces a las del AA 6082 - T6. A T_{amb} , puede observarse como el AA 7075 - T6 presenta casi el doble de resistencia máxima en la curva tensión - deformación. En ambas aleaciones a T_{amb} , se observa el efecto producido por la direccionalidad de grano, presentando mayores valores de límite elástico y resistencia las probetas longitudinales debido al menor tamaño de grano y asimismo, estas probetas presentan una mayor deformación hasta la rotura de las mismas.

A la T de emergencia, la AA 7075 - T6, sigue presentando valores muy superiores a la AA 6082 - T6. El efecto de la direccionalidad de grano a estas temperaturas disminuye, tendiendo a valores de resistencia máxima más similares con independencia de la direccionalidad en ambas aleaciones. Además, se determinó que las probetas mecanizadas en la orientación longitudinal presentan una ductilidad mayor, como consecuencia de su menor tamaño de grano.

En base a estos ensayos, puede determinarse que la AA 7075 - T6 garantiza el límite elástico de diseño (270 MPa) en ambas direcciones, incluso a T de emergencias. Es por ello, que para favorecer la integridad del sistema de boquillas COUNTERFOG durante los ensayos, se va a seleccionar esta aleación para la fabricación mayoritaria de las boquillas.

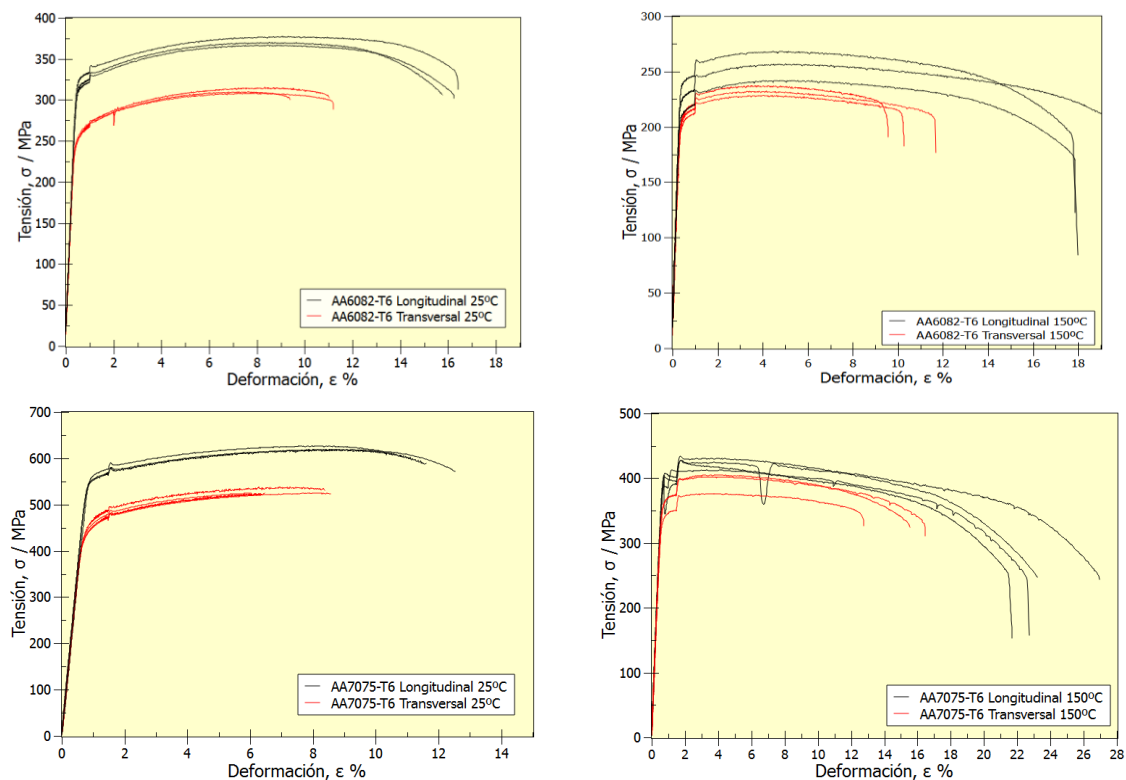


Figura 117. Resumen de los resultados de los ensayos a tracción para los distintos aluminios a las diferentes temperaturas de ensayo en función de la dirección de grano de la probeta.

4.4 Modelación de comportamiento en operación. Simulaciones Von Mises

En este apartado de la memoria de investigación se presentan las modelaciones realizadas al objeto de predecir el comportamiento y las resistencias máximas que va soportar el sistema diseñado en operación. Por dicho motivo y con la ayuda del programa SolidWorks [112], se modeló para cada uno de los dos modelos de boquillas y a las diferentes escalas, las tensiones generadas. Estas modelaciones se realizaron con el propósito de predecir la posibilidad de fallos o colapso del sistema en operación y la influencia de las disminuciones de tamaño y espesores de material en la resistencia mecánica del conjunto.

Para las boquillas a escala 1:1 va a tomarse como referencia la AA 6061 – T6, debido a que la AA 6082 – T6 no se encuentra disponible en la base de datos del programa. Esta aleación es una de las más ampliamente utilizada de la serie 6xxx y presenta propiedades mecánicas próximas a la AA 6082 – T6 (ver Tabla XXII). Para los conjuntos escalados a 1:2 y 1:3, se utilizó como referencia la AA 7075 – T6, debido a la mejora de las propiedades a altas temperaturas medida y expuesta en el punto anterior.

Los valores obtenidos de la modelación son conservadores ya que las características mecánicas de las aleaciones utilizadas por el programa (Tabla XXII) se encuentran por debajo de las solicitaciones mecánicas medidas en los materiales adquiridos.

Tabla XXII. Propiedades básicas de las aleaciones utilizadas por el programa SolidWorks [112].

	AA 6061 – T6	AA 7075 – T6
Límite elástico	275 MPa	505 MPa
Límite tracción	310 MPa	570 MPa

En todos los casos se impondrán las condiciones de contorno siguientes:

- Fijación de algunas caras al estar en contacto con otras partes de la boquilla, el resto se dejan libres.
- Presión de 2.5 MPa. Esta presión va a tender a distribuirse en las zonas interiores.

Las simulaciones se han realizado pensando en un mal funcionamiento de la boquilla a causa de una obstrucción para someter a condiciones extremas las piezas más débiles, como por ejemplo pueden ser las carcasas exteriores, piezas determinantes en el diseño.

Con las variables de fijaciones, presiones y material, el programa calcula las tensiones de VM generadas en las piezas, el desplazamiento y el factor de seguridad (FS) en relación al límite elástico del material a temperatura ambiente. Con este factor,

se puede saber cuándo se produciría una deformación plástica irreversible en el mismo. Además, se pueden comparar las tensiones máximas de VM, si fuera necesario, con las resistencias máximas de los materiales seleccionados para conocer si además de superarse el límite elástico se rompería la pieza. En concreto, en las imágenes que van a ilustrar estos resultados, únicamente se han mostrado la distribución de presiones y sujeciones de las piezas, las tensiones de VM generadas como consecuencia de la aplicación de estas presiones internas y el FS, considerando estos parámetros los más relevantes para el diseño, obviando el desplazamiento de la pieza producido. Aun así, se representa la dirección de la deformación magnificada para un mejor entendimiento.

4.4.1 Boquilla B

A continuación, se presenta un esquema del modelo B de boquilla (Figura 118). En base a este modelo se han realizado las simulaciones exprés anteriormente comentadas a las diferentes escalas. En los siguientes puntos de la presente memoria se exponen los resultados obtenidos. Asimismo, en el punto 4.4.1.4, se realiza una comparativa de los resultados obtenidos a las diferentes escalas.

- Boquilla original (escala 1:1): Figura 119 a Figura 129. Con esta escala de boquilla y dado que se ha utilizado la aleación básica AA 6061 – T6, la pieza Top_flage, es la única que presenta problemas en algunas zonas si la boquilla se obstruyese y toda la presión de los fluidos retornara hacia la tapa superior. En algunos puntos las resistencias de VM calculadas superan al límite elástico del material. En estos puntos el factor de seguridad está por debajo de 1. Con la utilización de una aleación de mayor límite elástico este efecto queda subsanado como se observa en las boquillas B 1:2 y B 1:3.
- Boquilla B 1:2: Figura 130 a Figura 140. No se supera el límite de seguridad a T_{amb} en ninguna de las piezas bajo las circunstancias desfavorables planteadas. Su fabricación es viable en la AA 7075 – T6.
- Boquilla B 1:3: Figura 141 a Figura 151. Como en el caso anterior, no se supera el límite de seguridad a T_{amb} en ninguna de las piezas bajo las circunstancias desfavorables planteadas. Su fabricación es viable en la AA 7075 – T6.

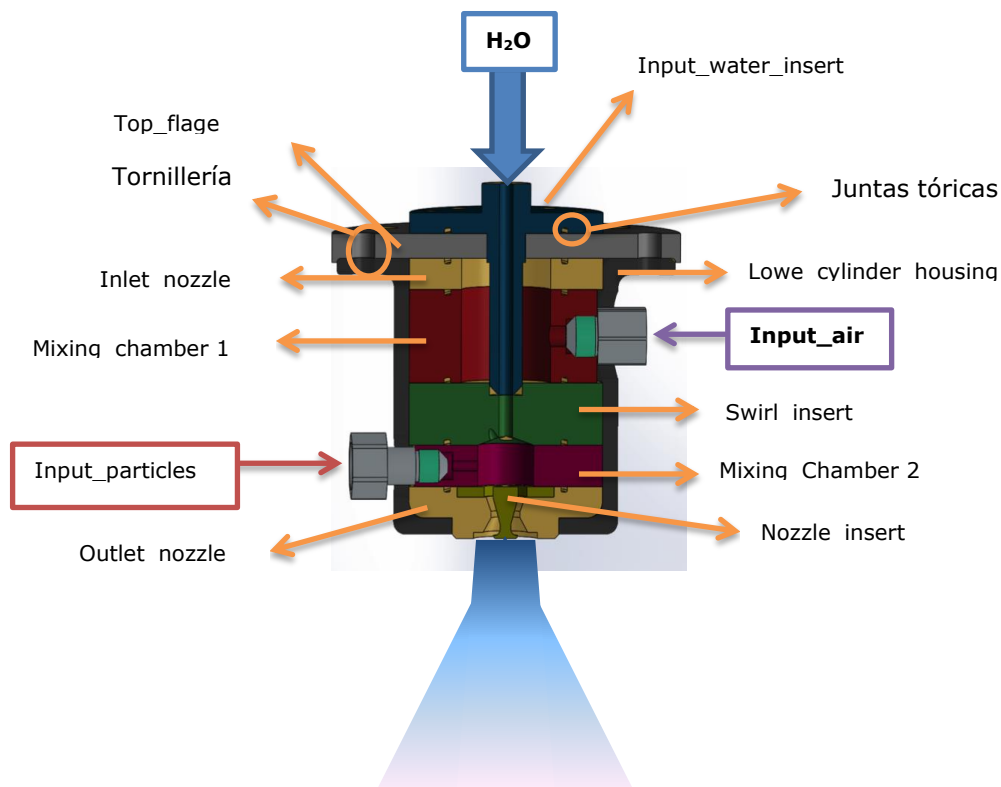


Figura 118. Esquema básico del modelo de boquilla B.

4.4.1.1 Diseño original, escala 1:1

A continuación, se muestran de manera gráfica los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones y para cada una de las piezas de la boquilla B a escala 1:1. En estas figuras se representan la distribución de presiones (flechas rojas) y las caras tomadas como fijas (flechas verdes), así como las tensiones de VM a consecuencia de la distribución de presiones y el FS de la boquilla. Se ha representado el FS de 1, para así poder mostrar aquellas zonas en las que se supere el valor de límite elástico del material. Indicar que el desplazamiento de las piezas de la boquilla está sobredimensionado para que pueda apreciarse fácilmente.

En la pieza mostrada en la Figura 120, para las condiciones adversas propuestas se supera en algunas zonas, tornillería por ejemplo, el factor de seguridad de 1, lo que quiere decir que se supera el límite elástico del material. Además, en este caso también se supera la resistencia máxima del material. En los puntos de mínimo FS, las tensiones de VM generadas por un mal funcionamiento son de 404 MPa, con la utilización del AA 7075 – T6 con un límite elástico de 505 MPa y una resistencia máxima de 570 MPa en el programa SolidWork, el problema quedaría subsanado y no se superaría el límite elástico del material.

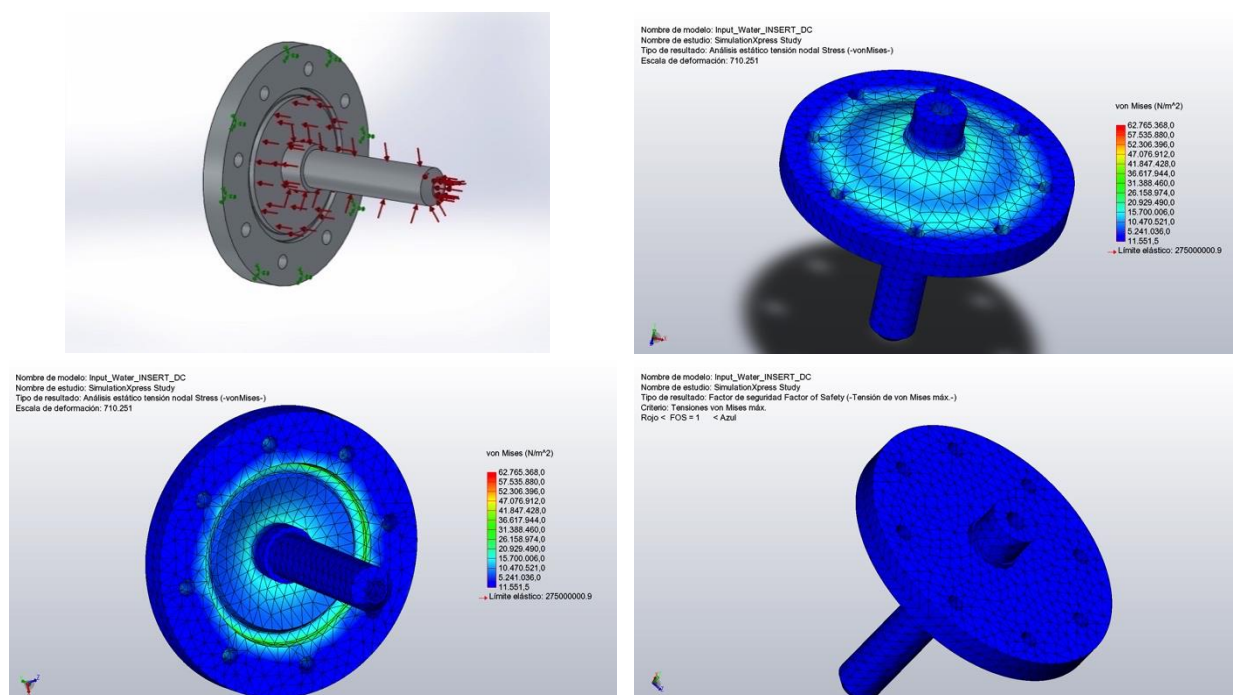


Figura 119. Análisis de tensiones de input_water_insert escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 4.4.

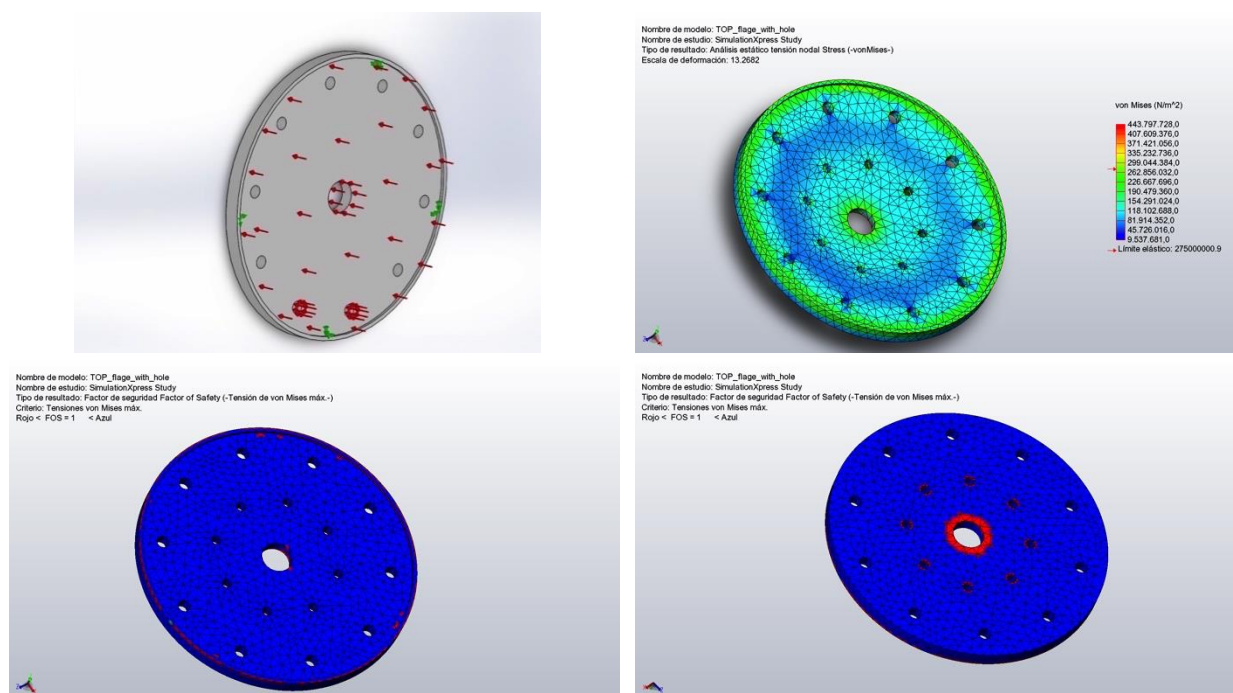


Figura 120. Análisis de tensiones de top_flaje escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 0.6.

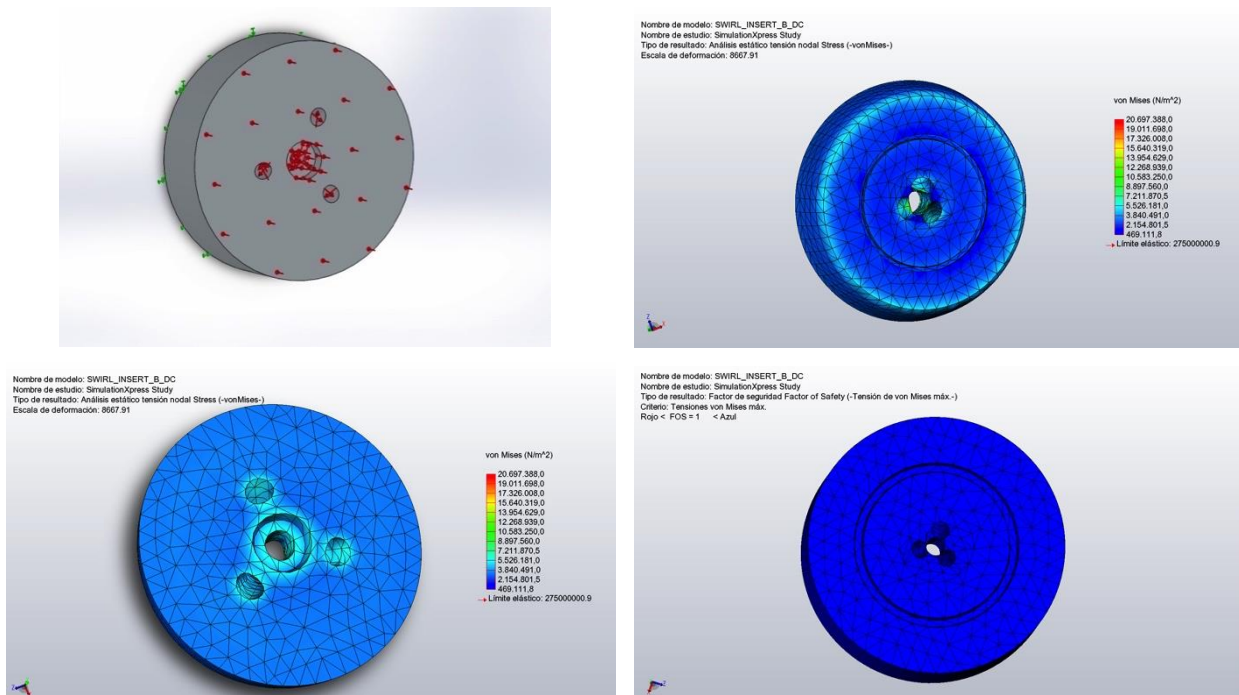


Figura 121. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 13.3.

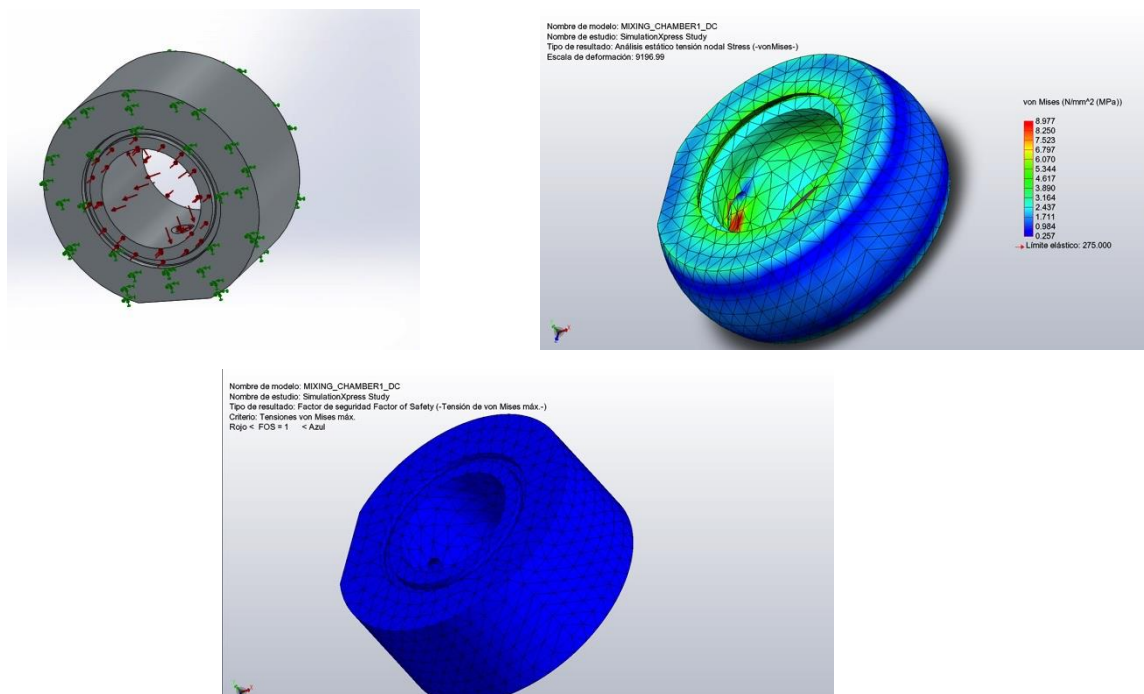


Figura 122. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 30.6.

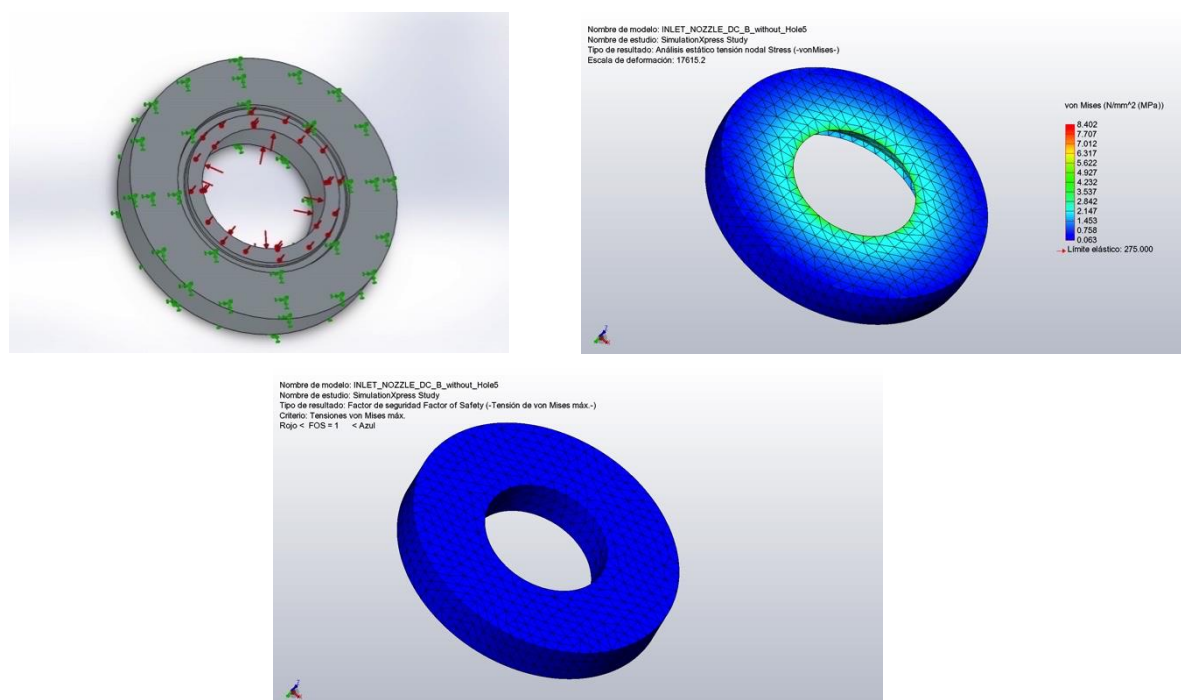


Figura 123. Análisis de tensiones de inlet_nozzle escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 32.7.

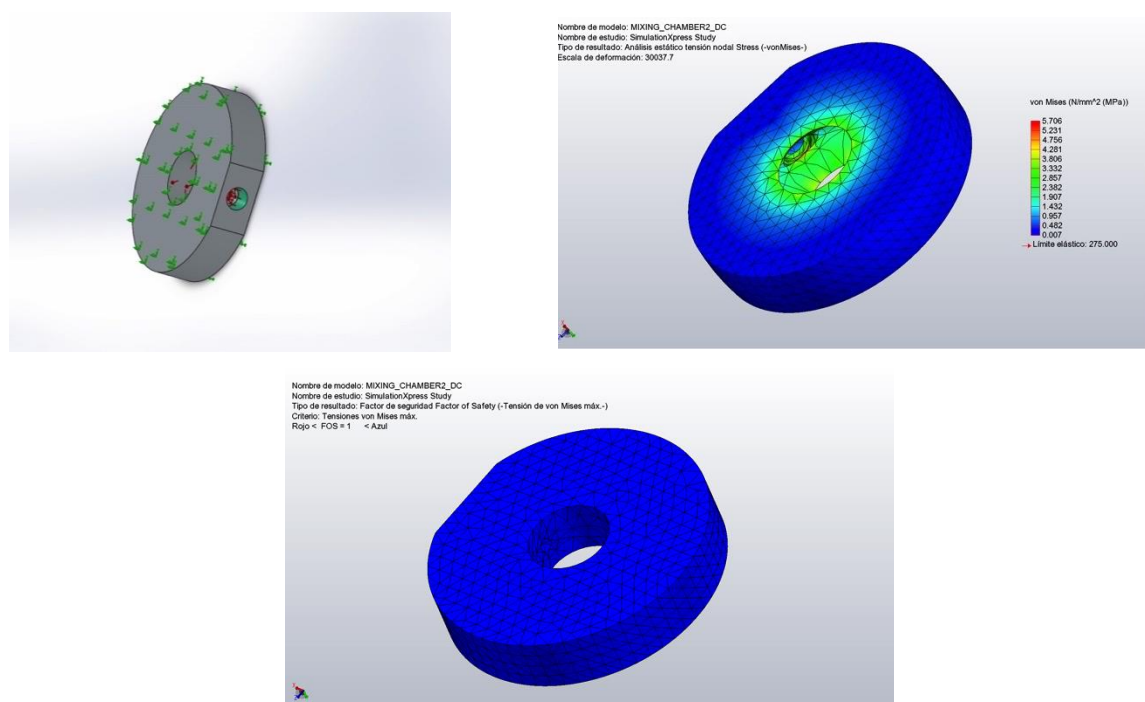


Figura 124. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 48.2.

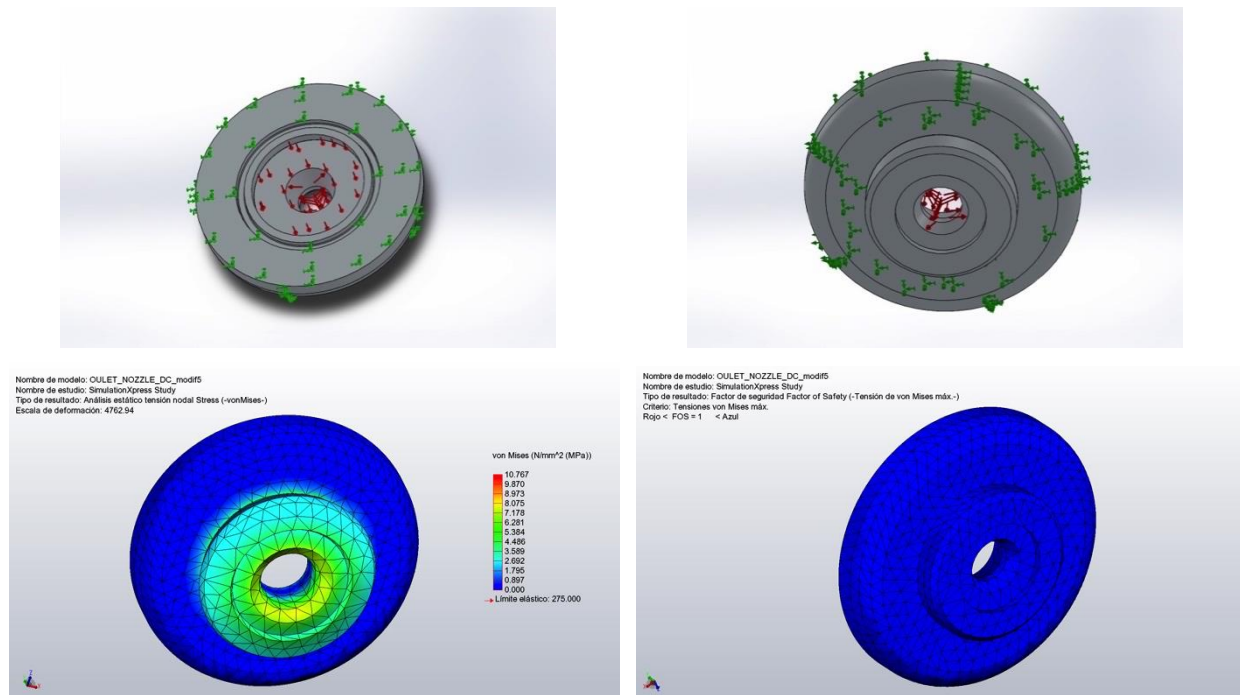


Figura 125. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 25.5.

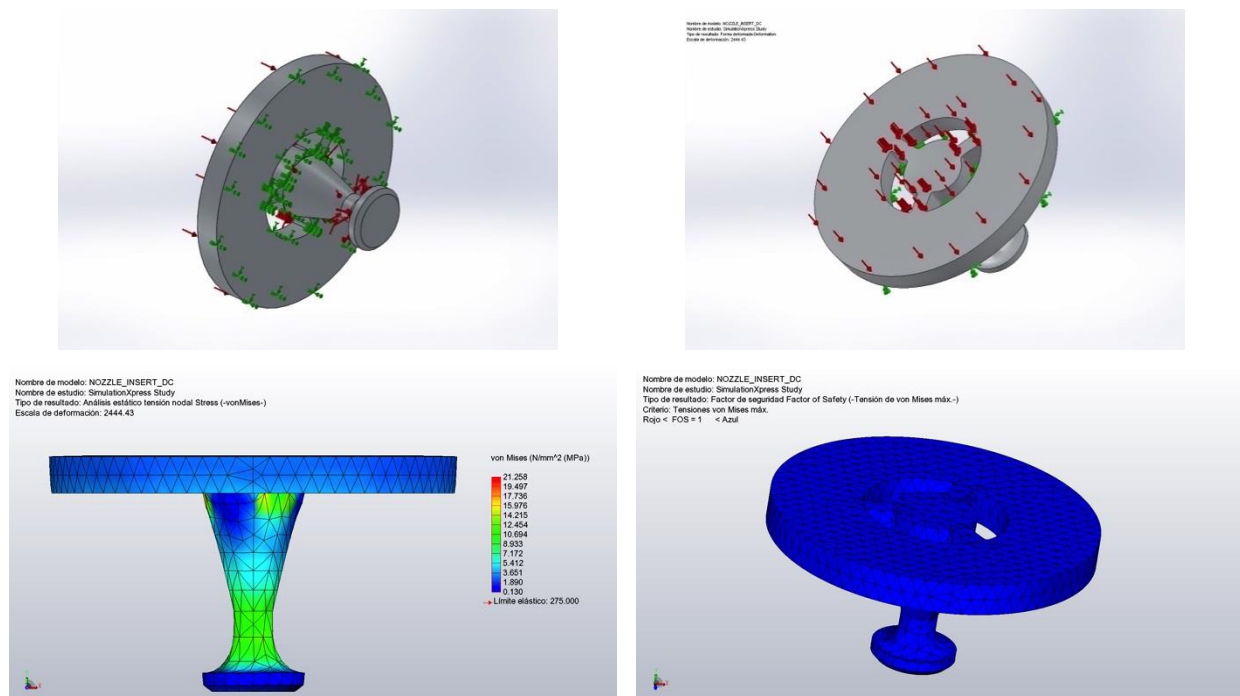


Figura 126. Análisis de tensiones de nozzle_insert escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 19.9.

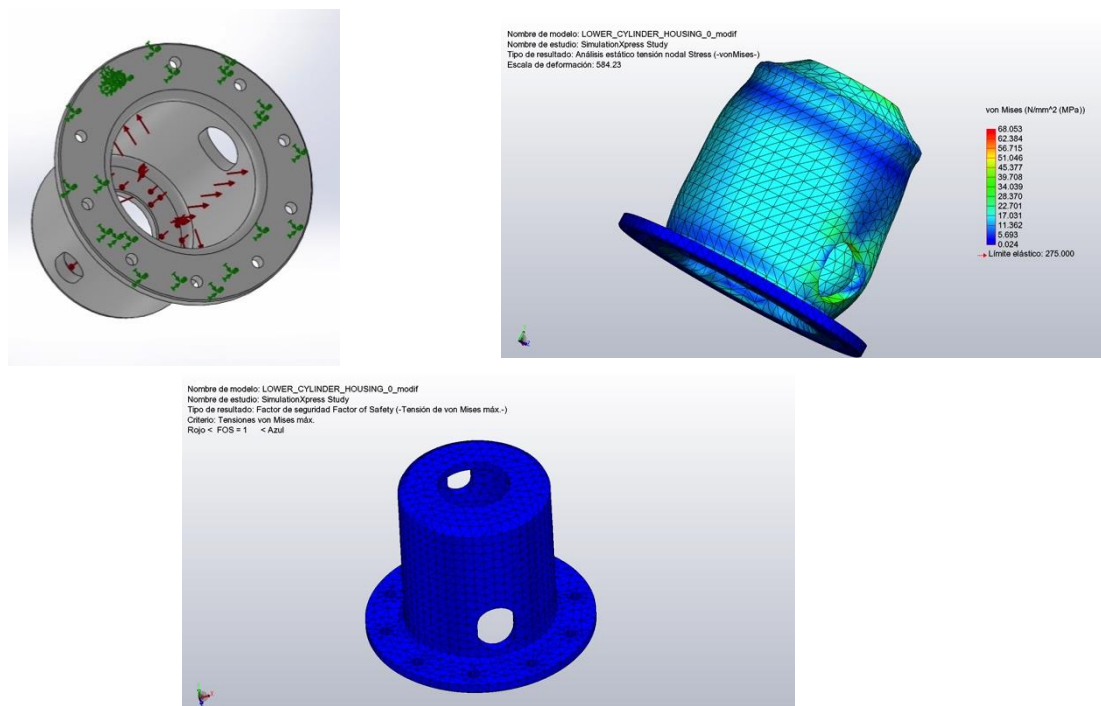


Figura 127. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 4.0.

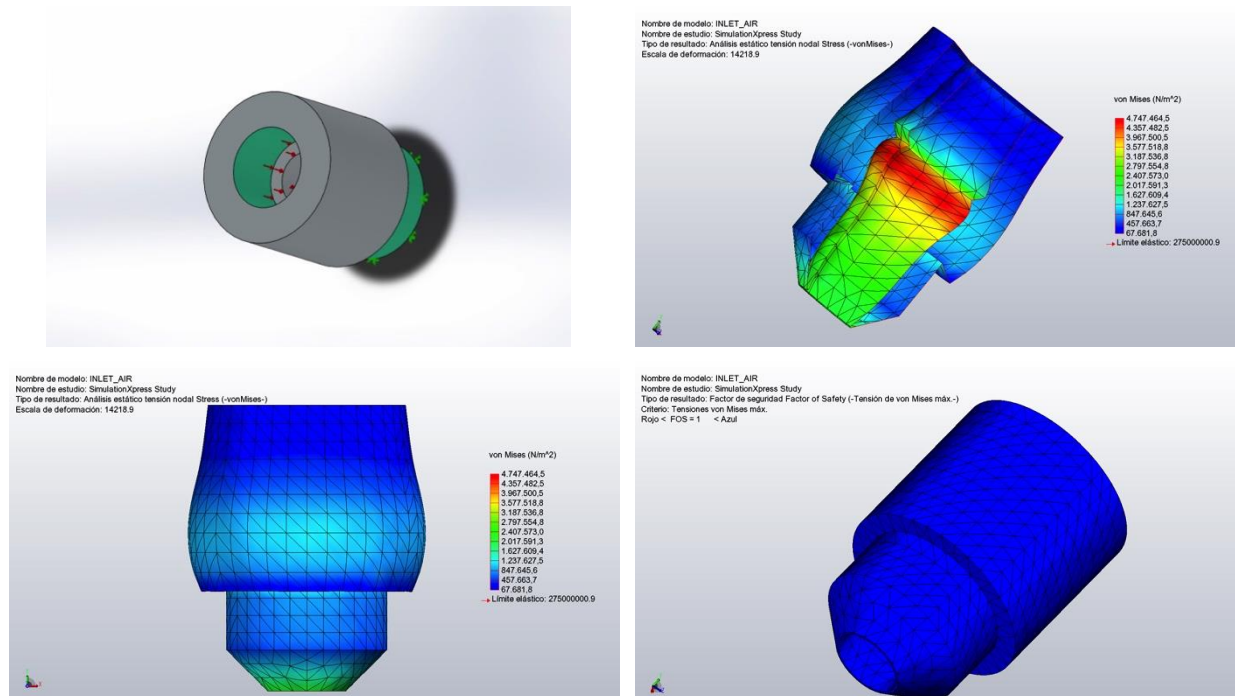


Figura 128. Análisis de tensiones de input_air escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 57.9.

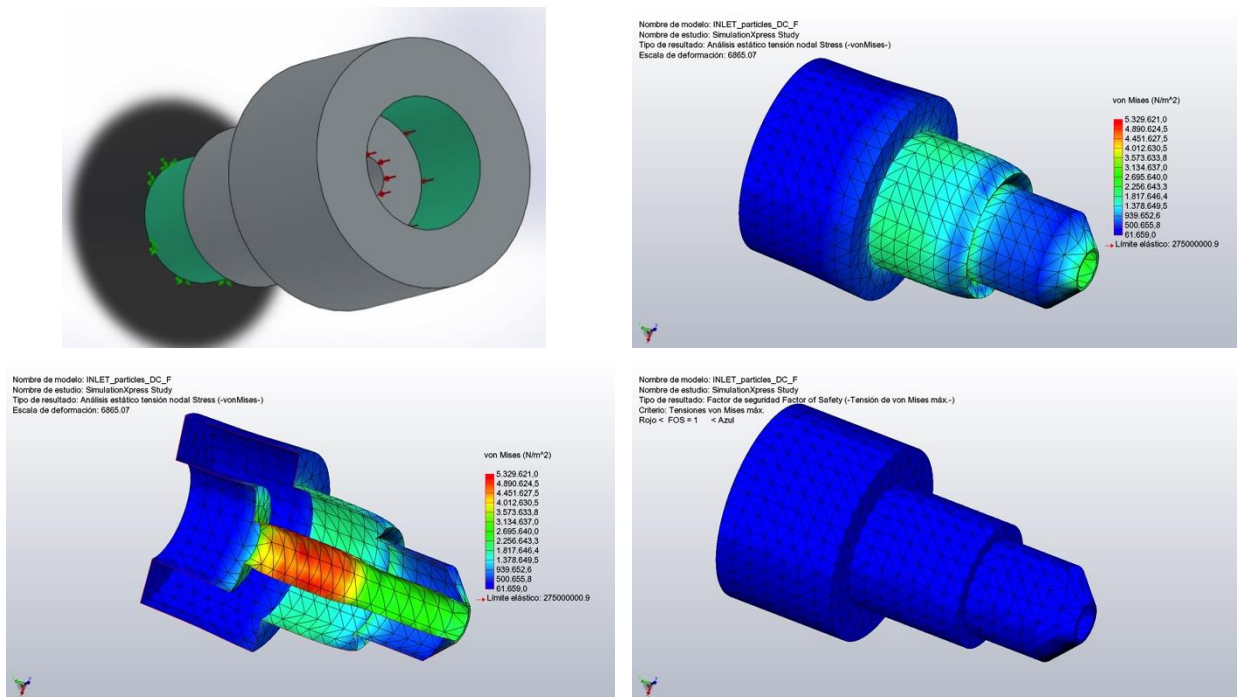


Figura 129. Análisis de tensiones de inlet_particles escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 51.6.

4.4.1.2 Escala 1:2

A continuación, se muestran las simulaciones de cada una de las piezas de la boquilla B a escala 1:2. Se presentan, como en el caso anterior, la distribución de presiones (flechas rojas) y las caras tomadas como fijas (flechas verdes), así como las tensiones de VM a consecuencia de la distribución de presiones y el FS de la boquilla. Recordar que se ha representado el FS de 1, para así poder mostrar aquellas zonas en las que se supera el valor del límite elástico del material y que el desplazamiento de las piezas de la boquilla está sobredimensionado para que pueda apreciarse fácilmente.

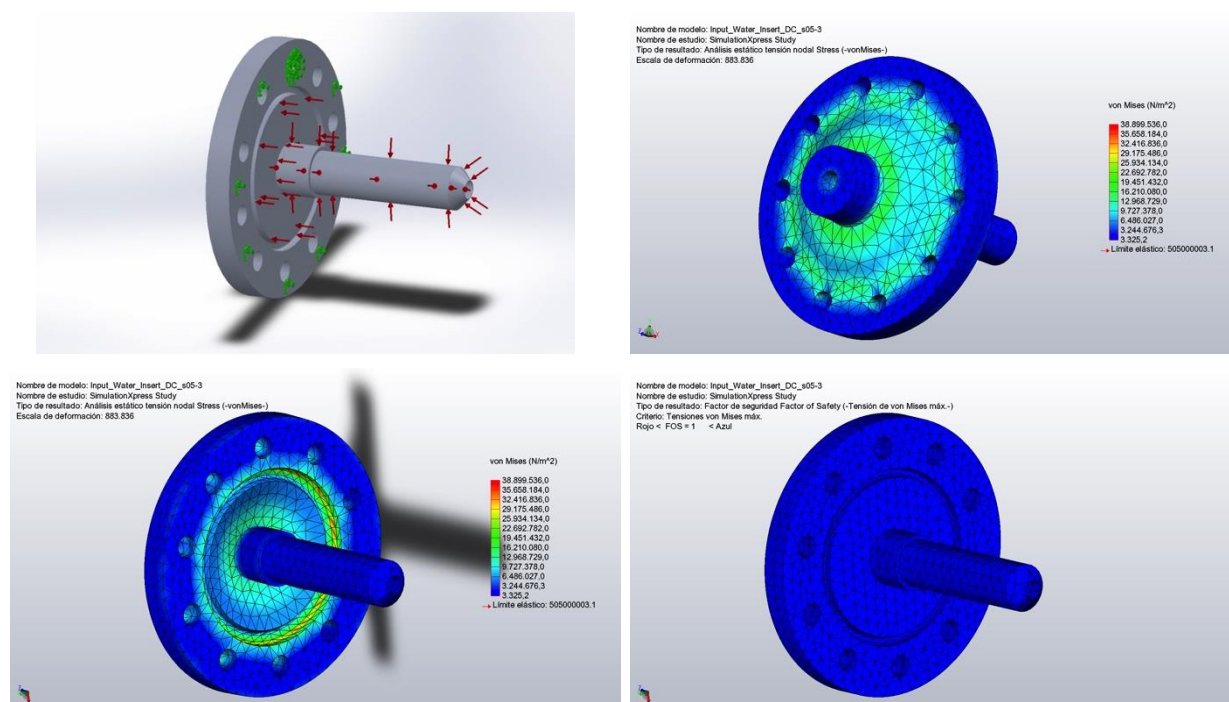


Figura 130. Análisis de tensiones de input_water_Insert escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 13.8.

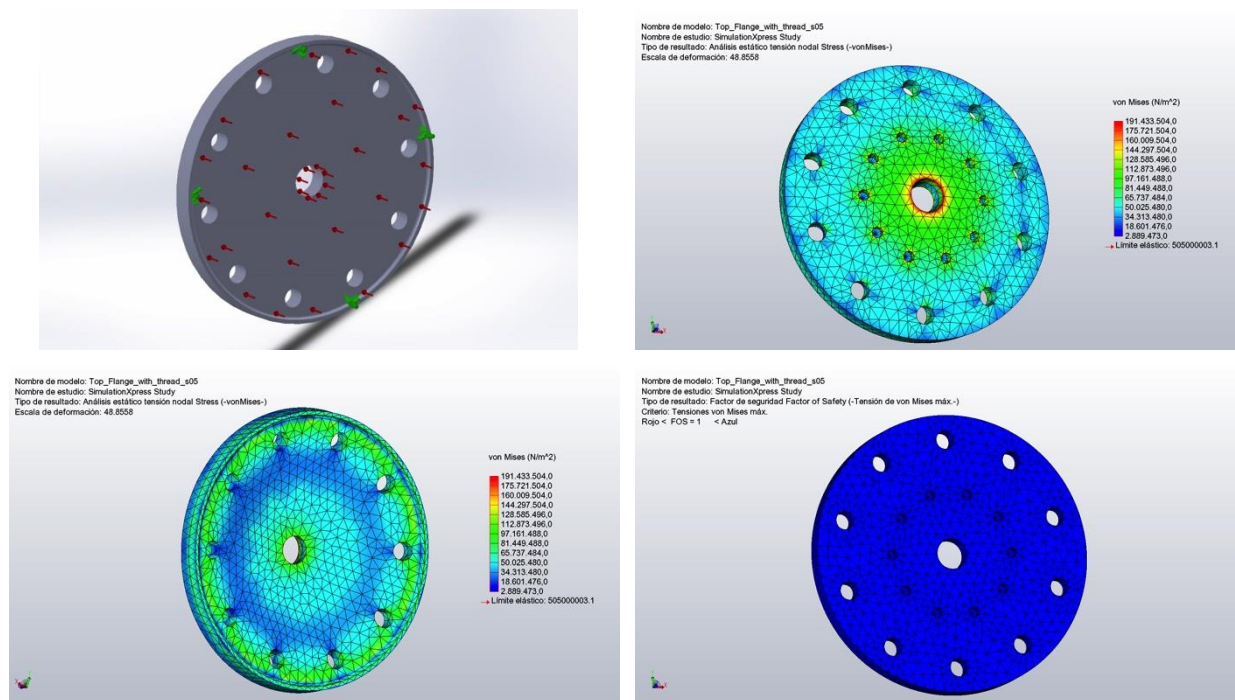


Figura 131. Análisis de tensiones de top_flaje escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 2.6.

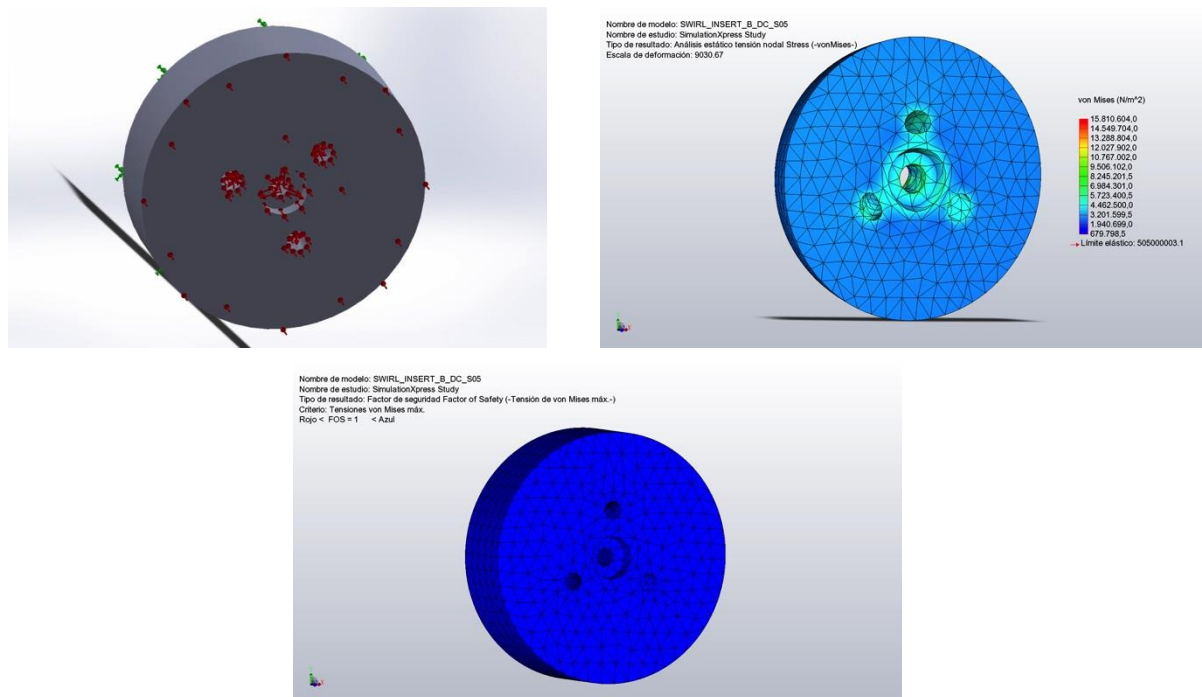


Figura 132. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 31.9.

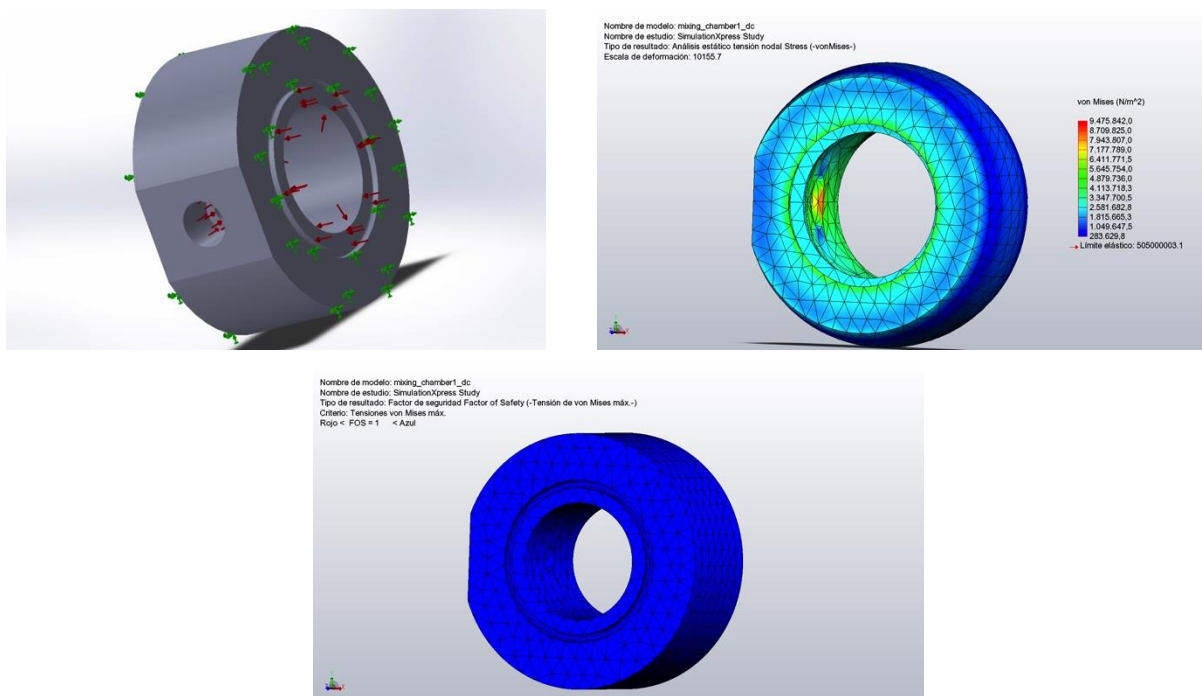


Figura 133. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 53.3.

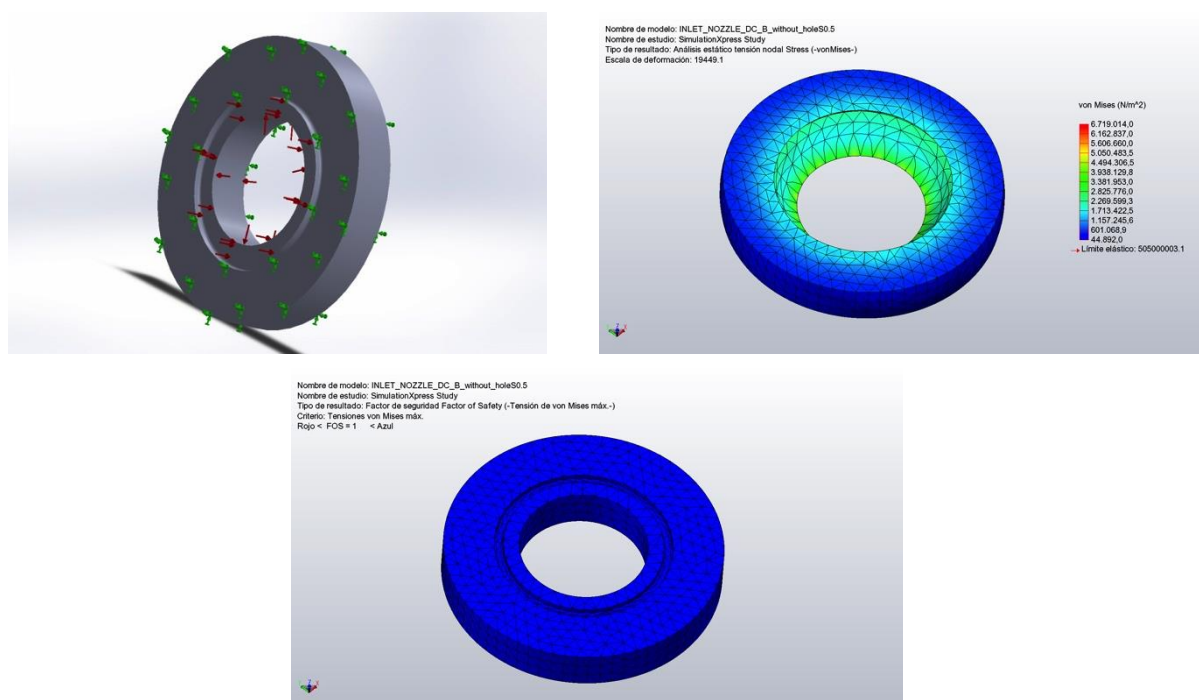


Figura 134. Análisis de tensiones de inlet_nozzle escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 75.1.

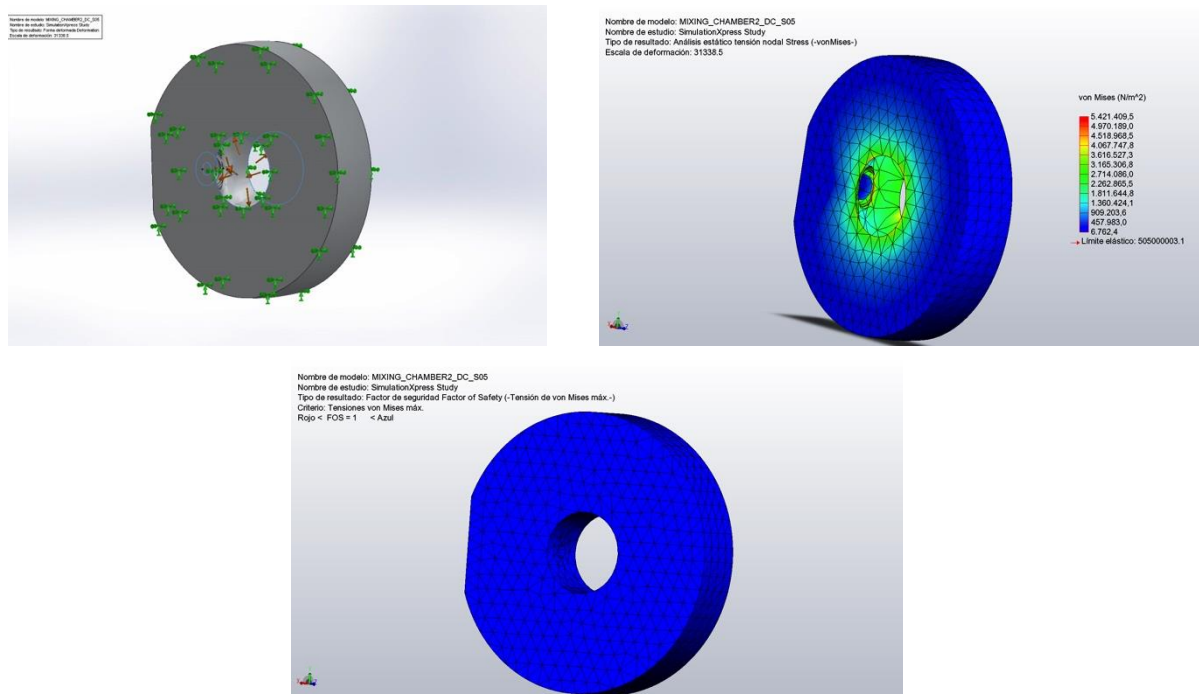


Figura 135. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 93.2.

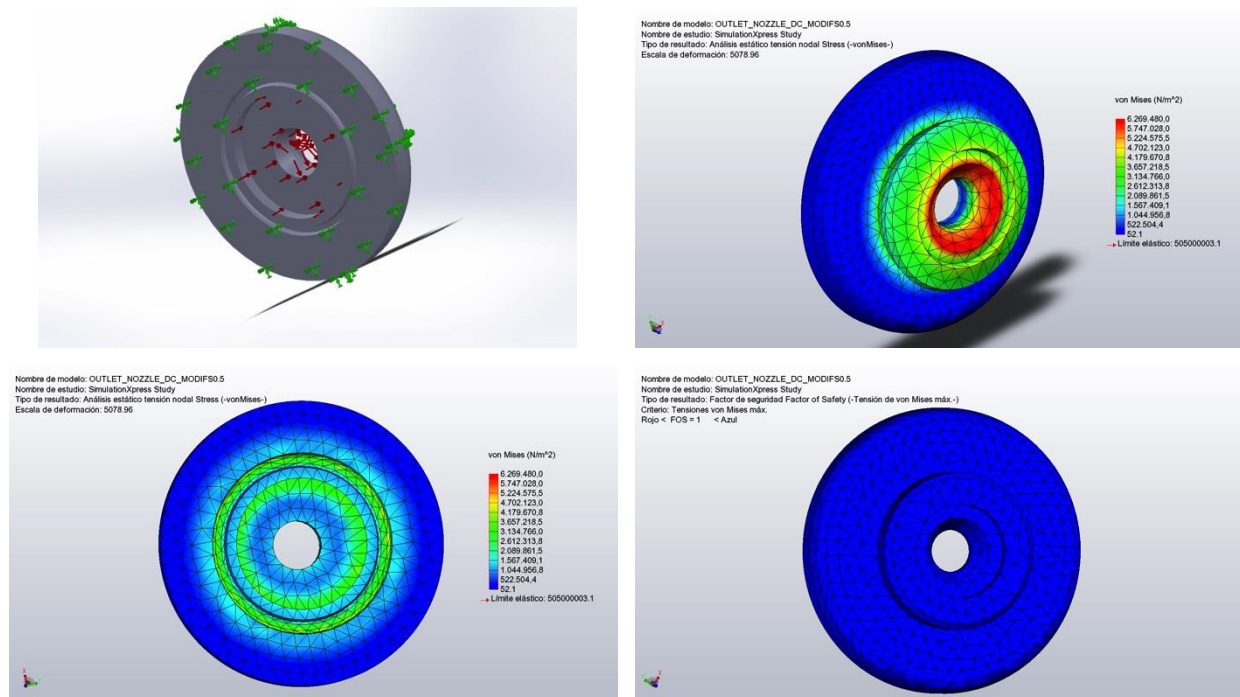


Figura 136. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 80.5.

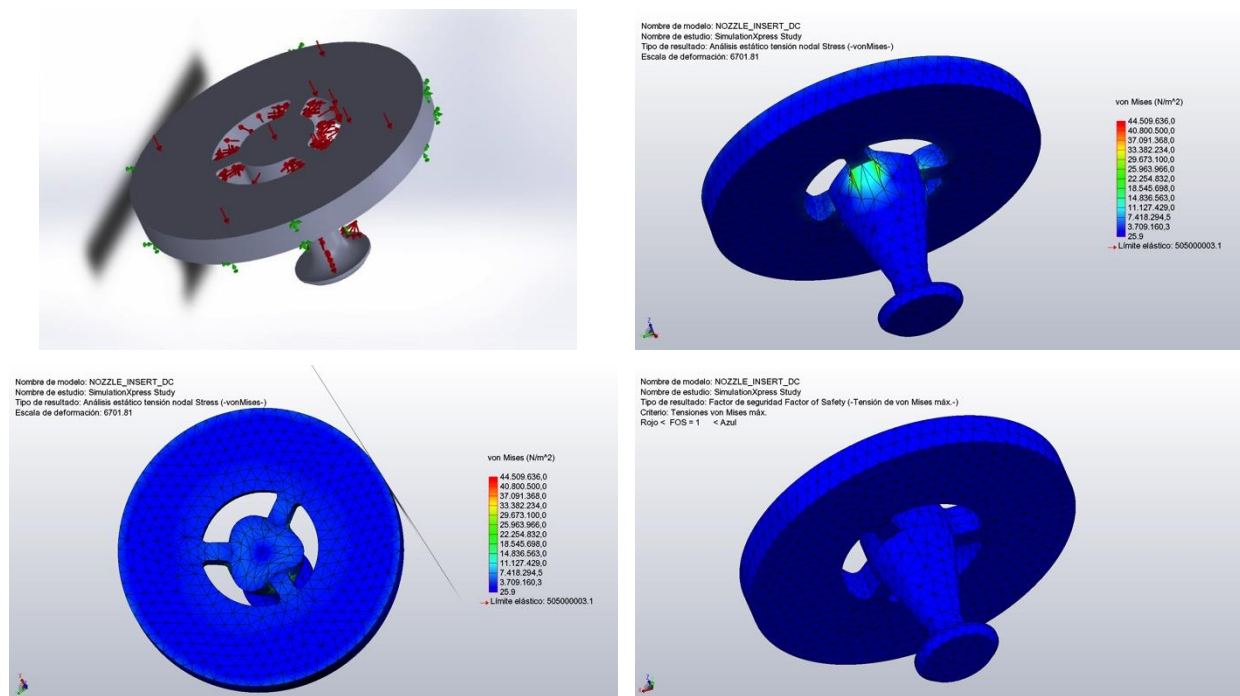


Figura 137. Análisis de tensiones de nozzle_insert escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 11.3.

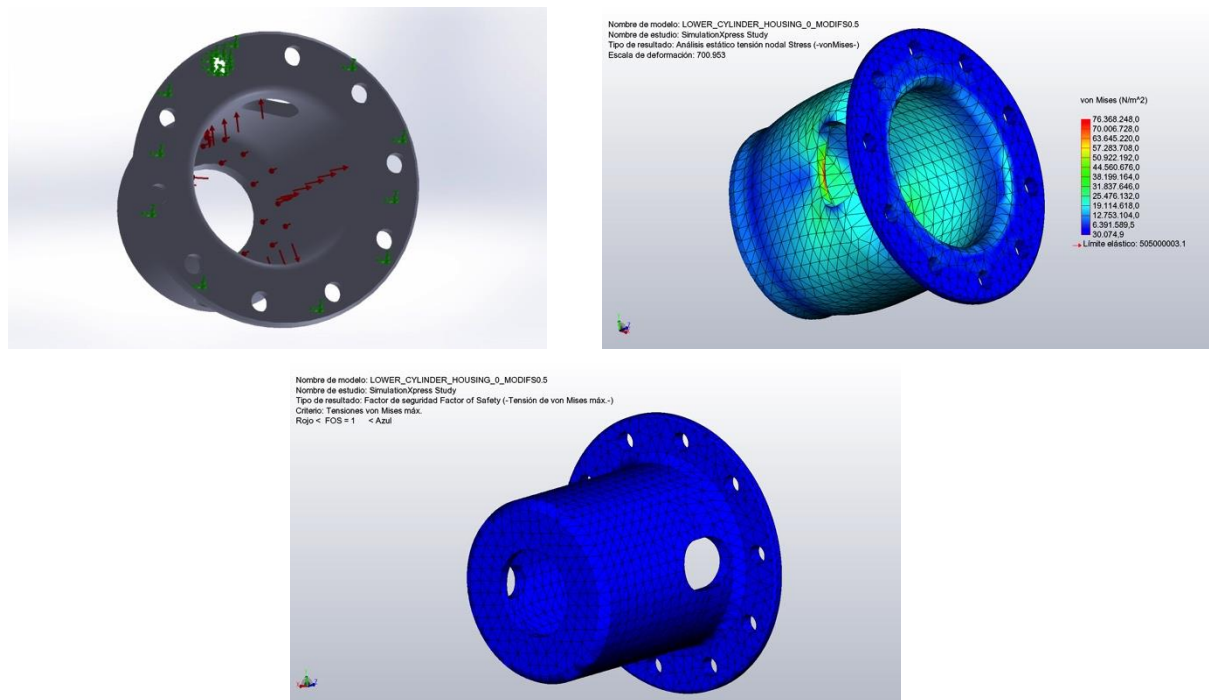


Figura 138. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 6.6.

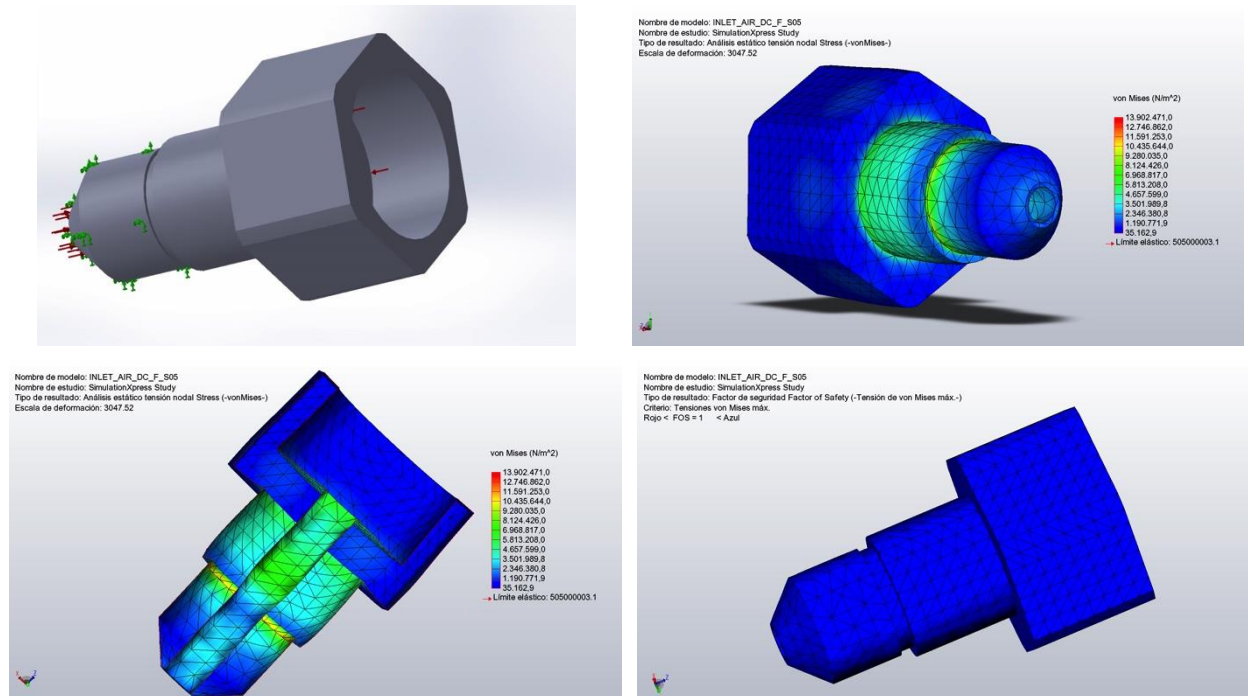


Figura 139. Análisis de tensiones de input_air escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 36.3.

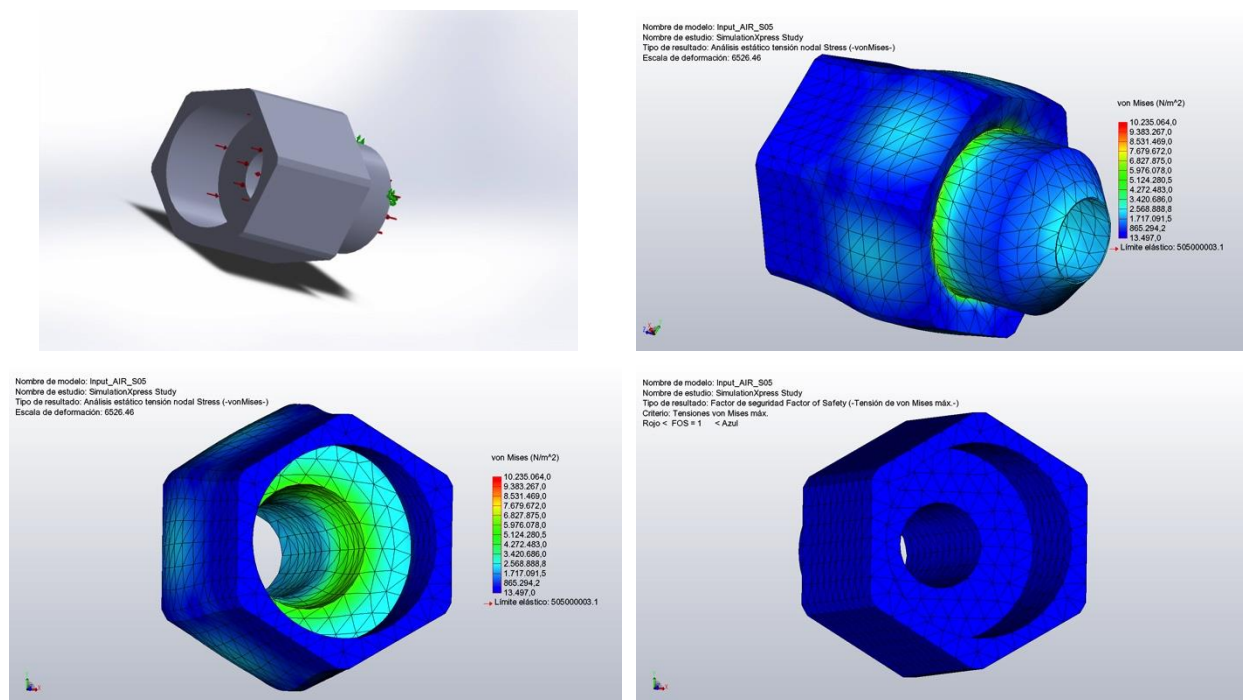


Figura 140. Análisis de tensiones de inlet_particles escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 49.3.

4.4.1.3 Escala 1:3

A continuación, se muestran las simulaciones de cada una de las piezas de la boquilla B a escala 1:3. Se presentan, como en el caso anterior, la distribución de presiones (flechas rojas) y las caras tomadas como fijas (flechas verdes), así como las tensiones de VM a consecuencia de la distribución de presiones y el FS de la boquilla. De nuevo recordar que se ha representado el FS de 1, para así poder mostrar aquellas zonas en las que se supera el valor del límite elástico del material y que el desplazamiento de las piezas de la boquilla está sobredimensionado para que pueda apreciarse fácilmente.

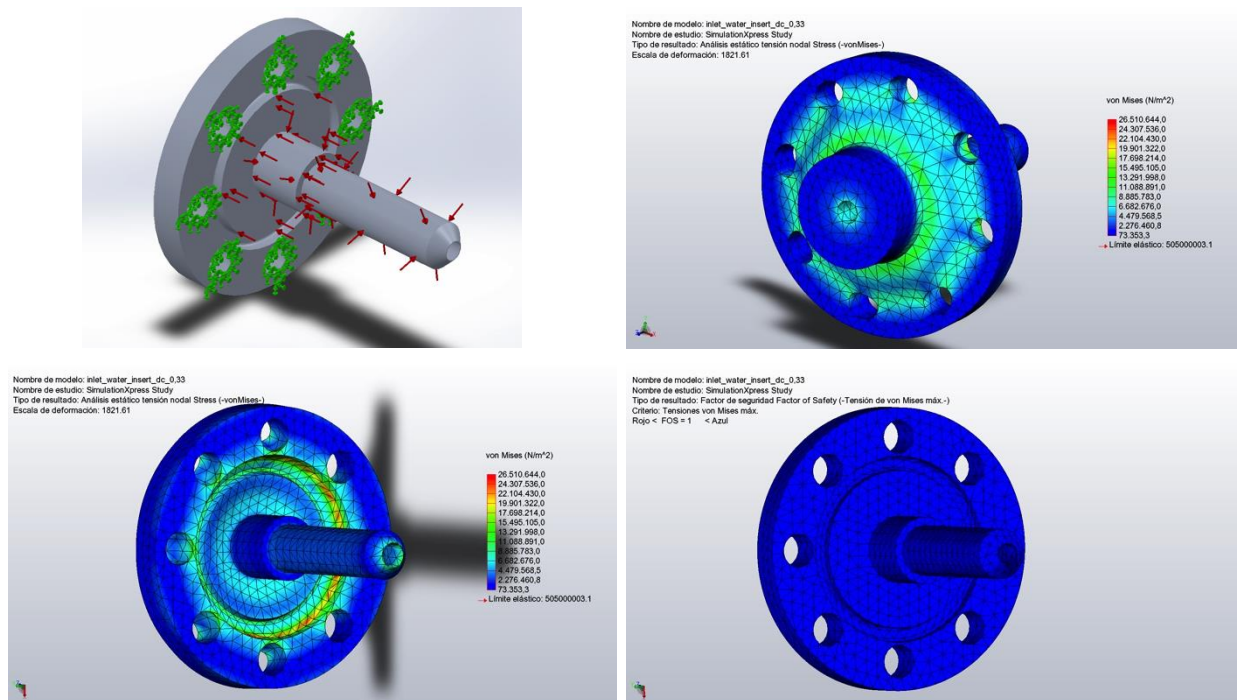


Figura 141. Análisis de tensiones de input_water_Insert escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 19.0.

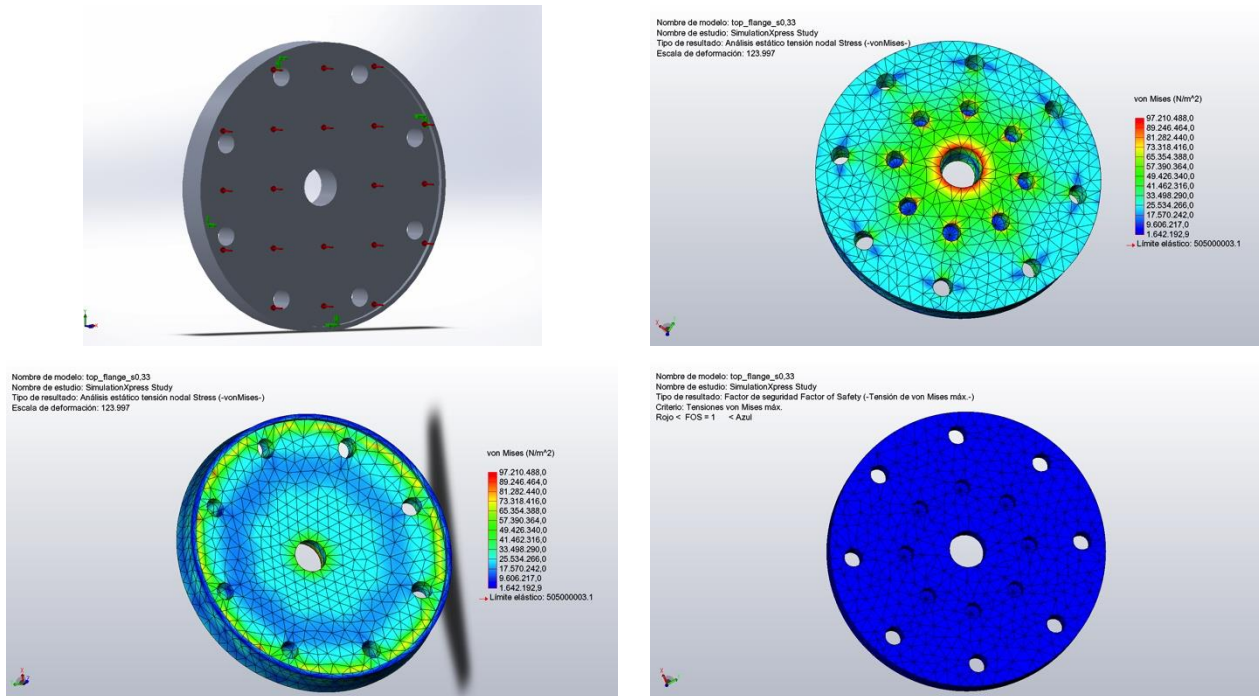


Figura 142. Análisis de tensiones de top_flaje escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 5.2.

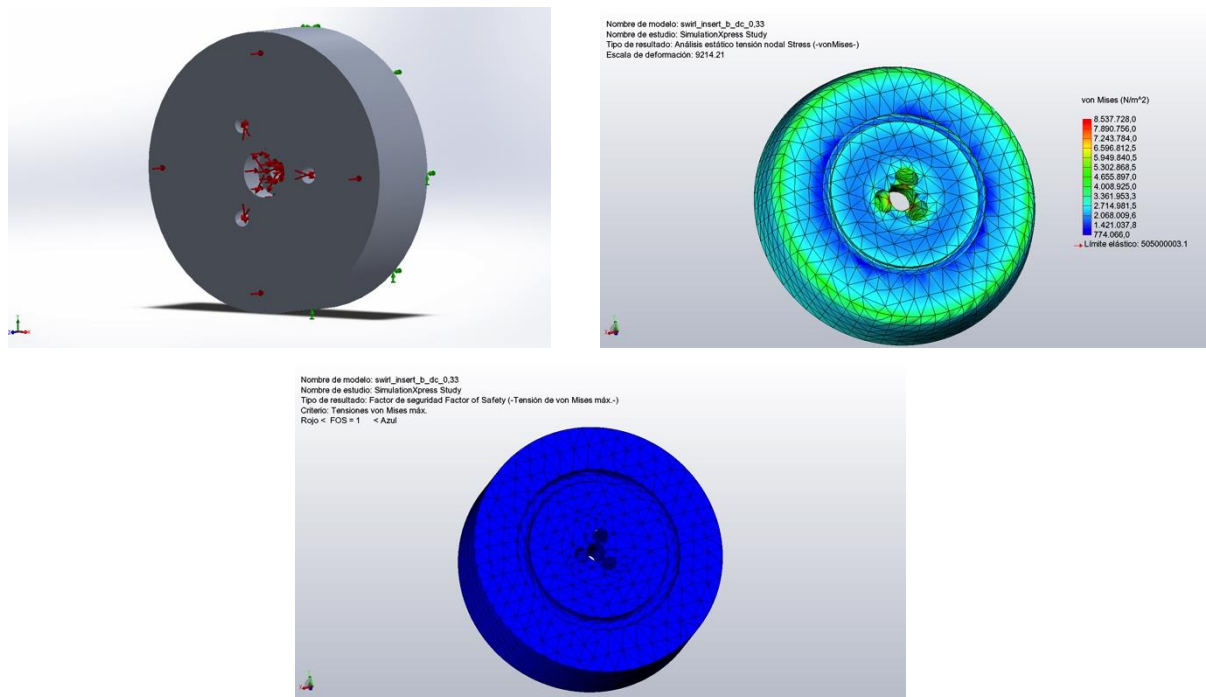


Figura 143. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 59.1.

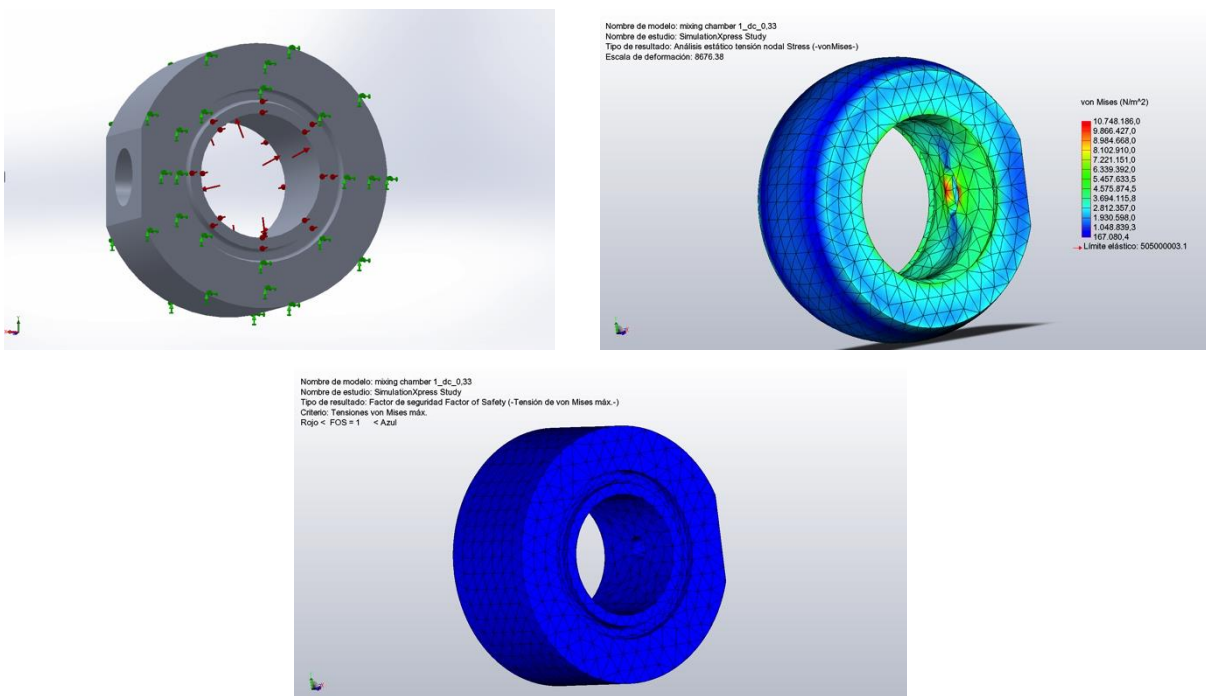


Figura 144. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 47.0.

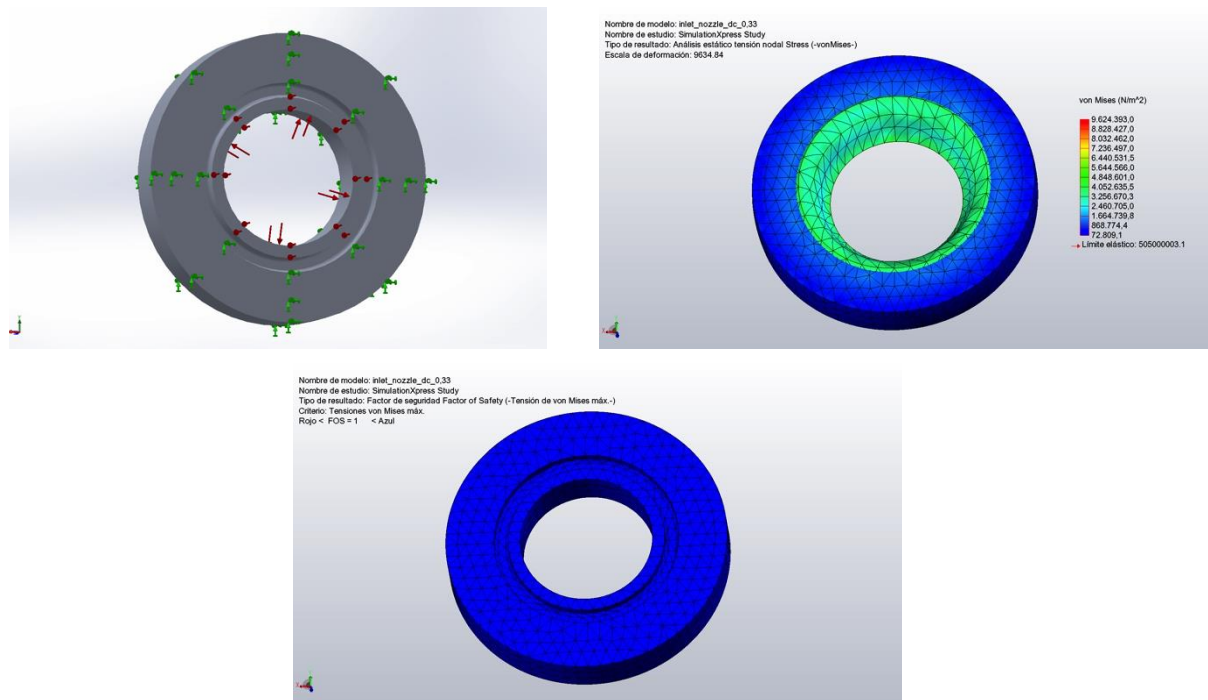


Figura 145. Análisis de tensiones de inlet_nozzle escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 52.5.

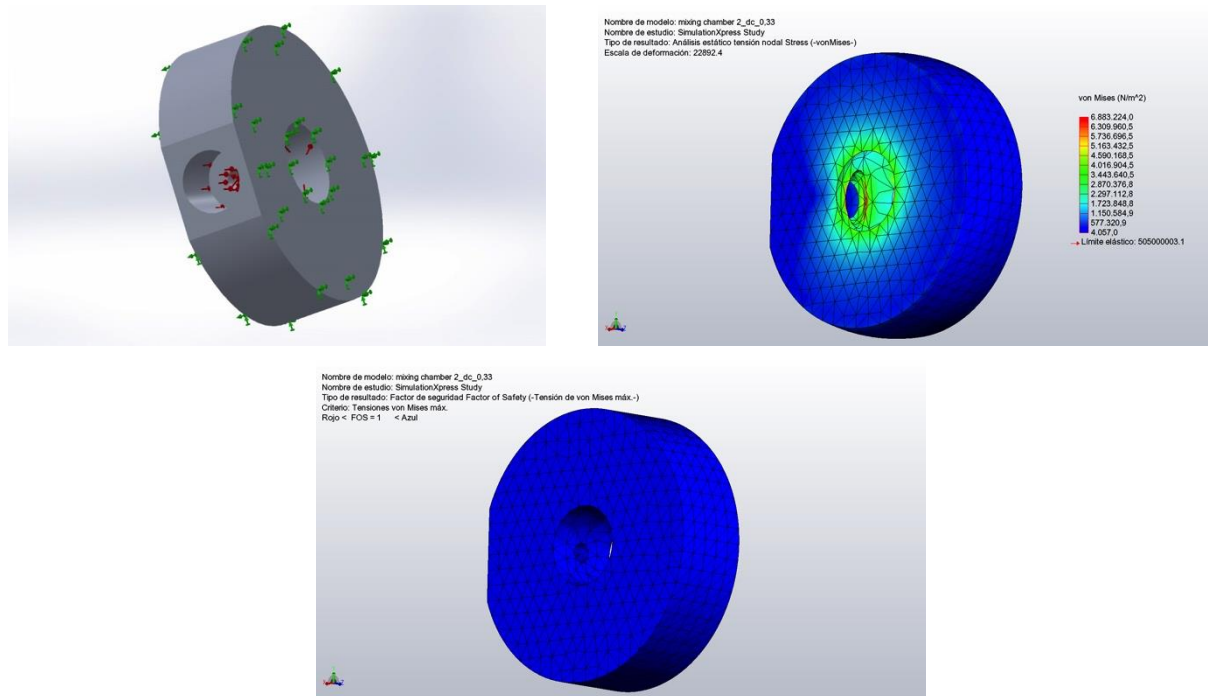


Figura 146. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 73.4.

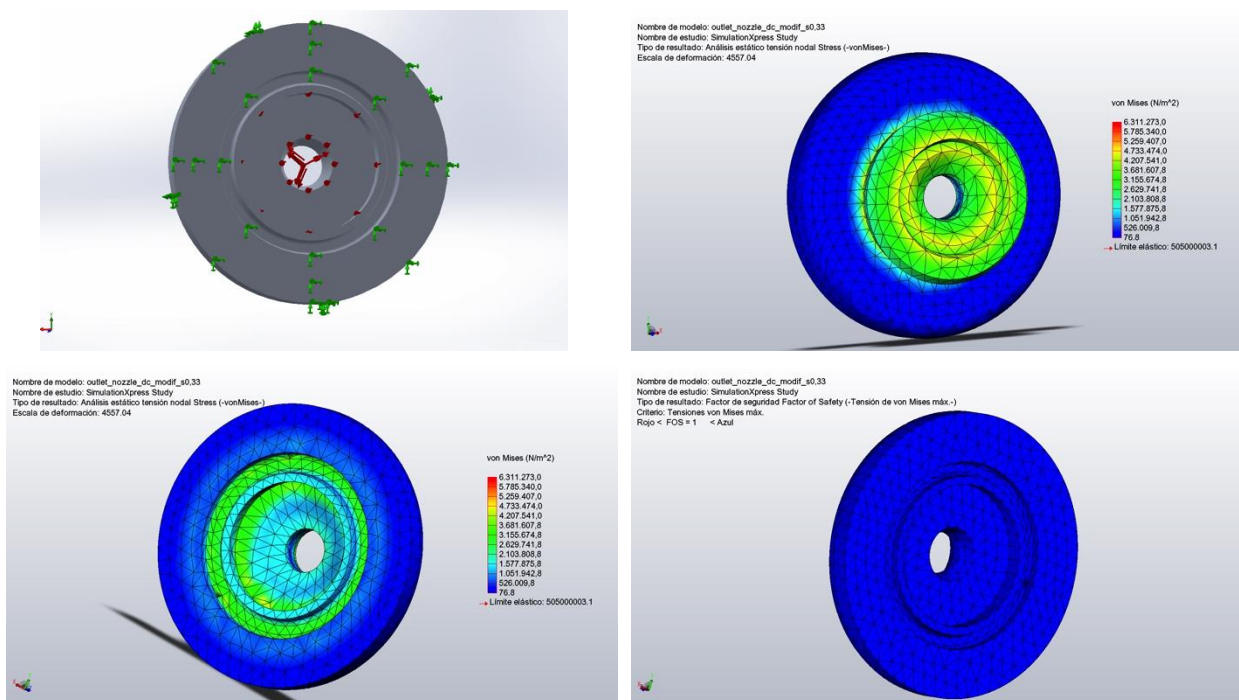


Figura 147. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 80.5.

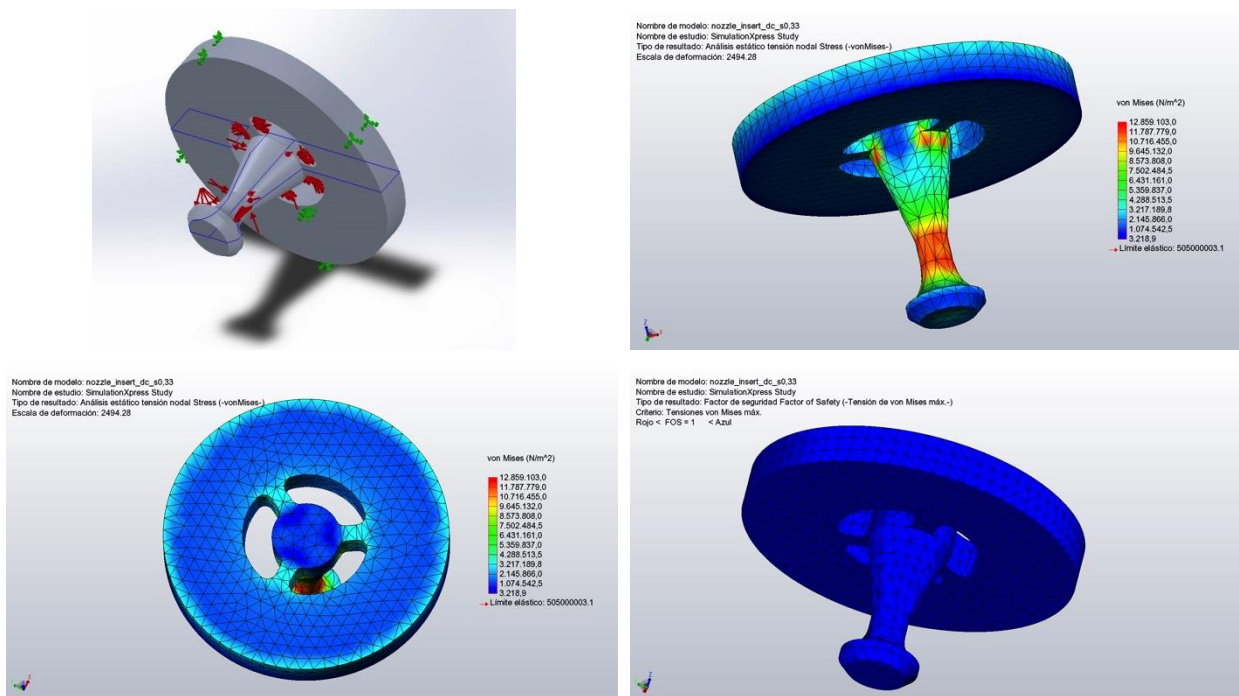


Figura 148. Análisis de tensiones de nozzle_insert escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 39.3.

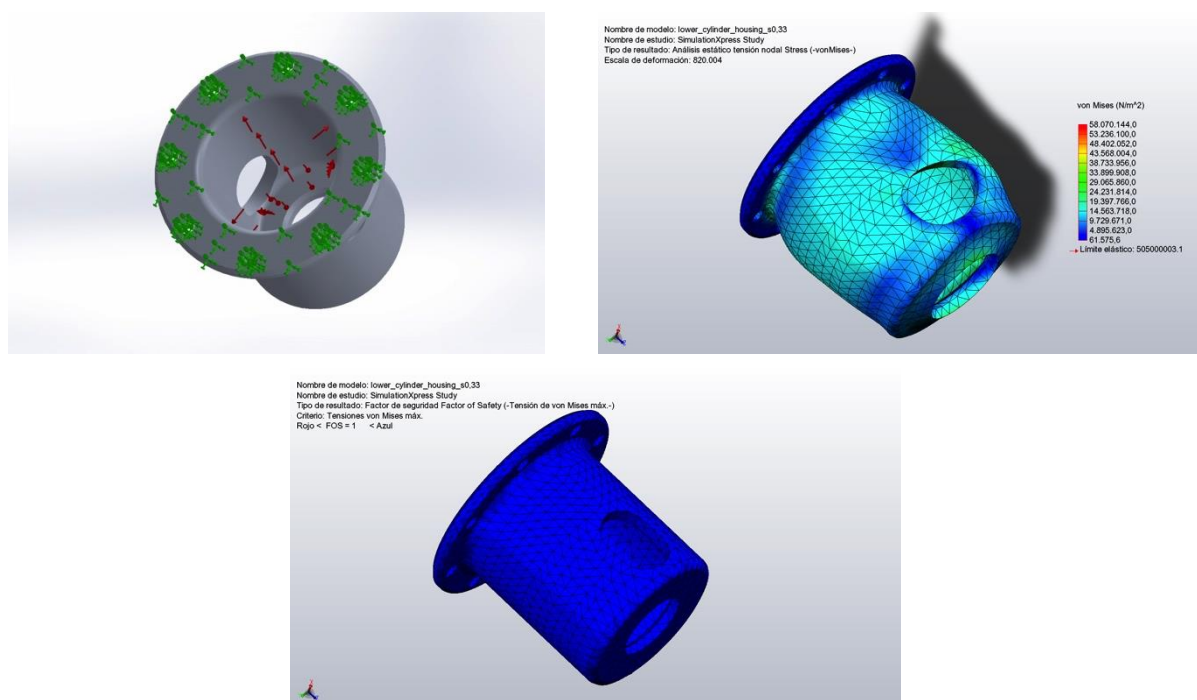


Figura 149. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es $FS = 8.7$.

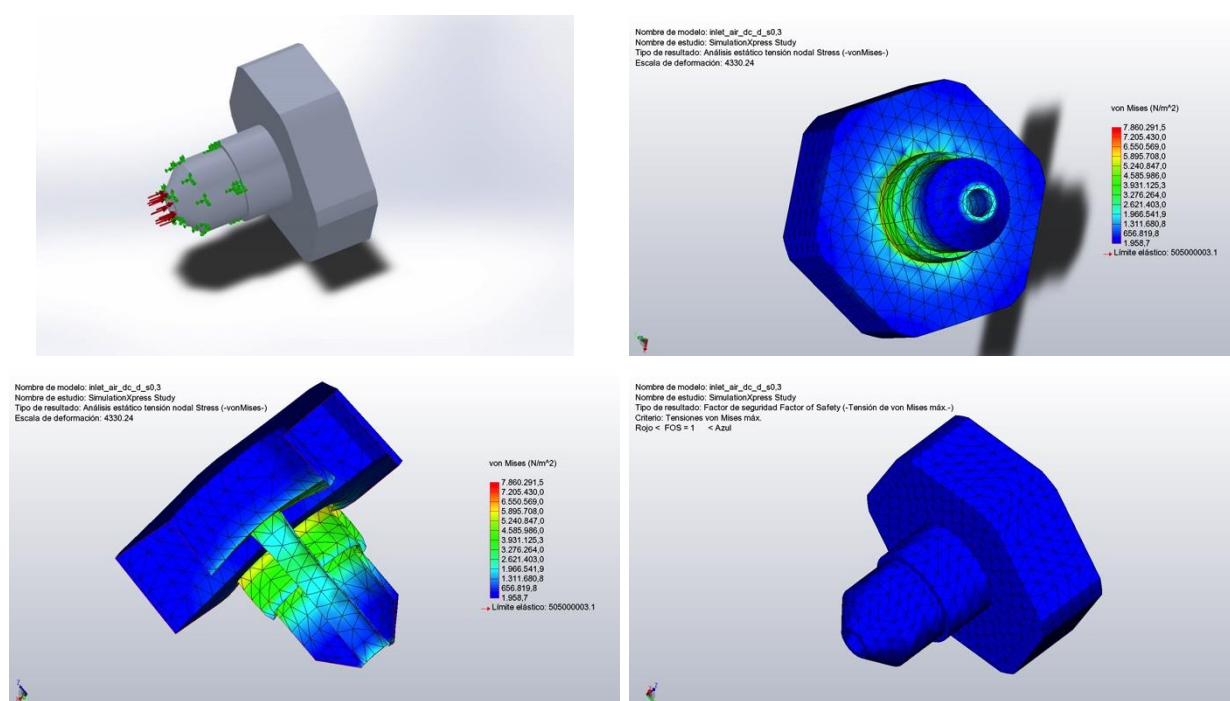


Figura 150. Análisis de tensiones de input_air escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es $FS = 63.4$.

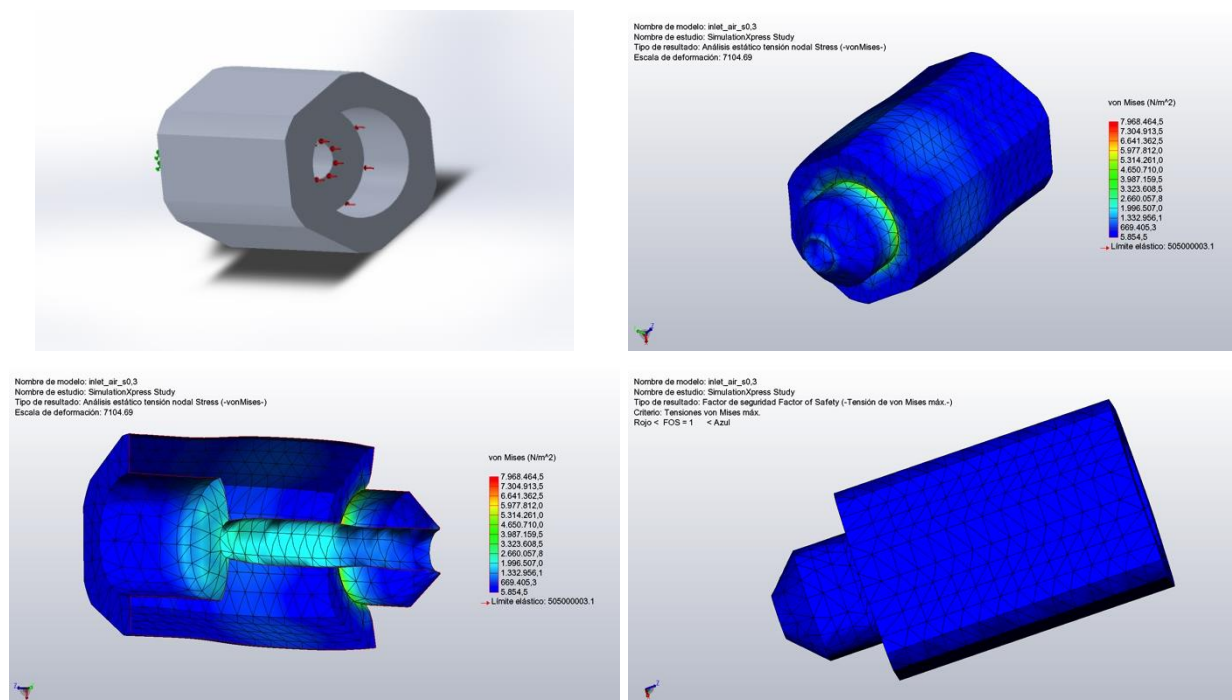


Figura 151. Análisis de tensiones de inlet_particles escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 64.3.

4.4.1.4 Influencia del escalado en las propiedades mecánicas

A continuación, y para una mejor comprensión del lector, en la Tabla XXIII, se muestra la comparativa de los resultados obtenidos en las modelaciones. En la tabla se muestra el límite elástico ($\sigma_{p0.2}$) y resistencia del material seleccionado (σ_m), las tensiones de VM generadas por la presión de 2.5 MPa ejercida por el conjunto de fluidos (σ_{VM}), el desplazamiento generado por esta tensión (D_{max}) y el FS de diseño mínimo experimentado por cada una de las piezas, siendo este último parámetro clave para validar los materiales seleccionados para las boquillas.

Como conclusión parcial de este estudio, indicar que el FS de todas las piezas de la boquilla, excepto de la tapa superior a escala 1:1, son superiores a 2, lo que significa que el límite elástico del material seleccionado es el doble de las tensiones generadas en un mal funcionamiento de la boquilla. Únicamente el top_flage de la escala 1:1 presenta un FS menor de 1, lo que indica que en esta pieza se supera límite elástico del material en un funcionamiento anormal de la boquilla. Asimismo, es en la única pieza que se supera la resistencia máxima del material. Aun así, hay que destacar que estas simulaciones se realizaron en un funcionamiento adverso de la boquilla, suponiendo fugas y una presión invertida de agua en toda la superficie de la pieza y con unas propiedades de los materiales, dadas por el programa, conservadoras.

Tabla XXIII. Comparativa de los resultados principales obtenidos en las simulaciones del concepto de boquilla B.

Escala	Pieza	$\sigma_{p0.2}$ / MPa	σ_m / MPa	σ_{VM} / MPa	D_{Max} / mm	FS
Escala 1:1 en AA 6061 - T6	Input_water	275	310	63	$1.4 \cdot 10^{-2}$	4.4
	Top_Flage			446	1.3	0.6
	Swirl_insert			21	$1.4 \cdot 10^{-3}$	13.3
	Mixing_chamber 1			9	$1.1 \cdot 10^{-3}$	30.6
	Inlet_nozzle			8.4	$5.7 \cdot 10^{-4}$	32.7
	Mixing_chamber2			5.7	$3.3 \cdot 10^{-4}$	48.2
	Outlet_nozzle			11	$2.1 \cdot 10^{-3}$	25.5
	Nozzle_insert			21	$2.0 \cdot 10^{-3}$	12.9
	Lower_cylinder_Housing			68	$3.1 \cdot 10^{-2}$	4.0
	Input_air			4.7	$3.3 \cdot 10^{-4}$	57.9
	Inlet_particles			5.3	$7.3 \cdot 10^{-4}$	51.6
Escala 1:2 en AA 7075 - T6	Input_water	505	570	39	$5.8 \cdot 10^{-3}$	13
	Top_Flage			191	0.2	2.6
	Swirl_insert			16	$6.6 \cdot 10^{-4}$	31.9
	Mixing_chamber 1			9.5	$5 \cdot 10^{-4}$	53.3
	Inlet_nozzle			6.7	$2.6 \cdot 10^{-4}$	75.1
	Mixing_chamber2			5.4	$1.6 \cdot 10^{-4}$	93.2
	Outlet_nozzle			6.3	$9.9 \cdot 10^{-4}$	80.5
	Nozzle_insert			44	$3.8 \cdot 10^{-4}$	11.3
	Lower_cylinder_Housing			76	$1.3 \cdot 10^{-2}$	6.6
	Input_air			14	$8.2 \cdot 10^{-4}$	36.3
	Inlet_particles			10	$3.4 \cdot 10^{-4}$	49.3
Escala 1:3 en AA 7075 - T6	Input_water	505	570	26	$2.1 \cdot 10^{-3}$	19.0
	Top_Flage			97	$4.8 \cdot 10^{-2}$	5.2
	Swirl_insert			8.5	$4.3 \cdot 10^{-4}$	59.1
	Mixing_chamber 1			11	$4.2 \cdot 10^{-4}$	47.0
	Inlet_nozzle			9.6	$8.6 \cdot 10^{-4}$	52.5
	Mixing_chamber2			6.9	$1.5 \cdot 10^{-4}$	73.4
	Outlet_nozzle			6.3	$7.5 \cdot 10^{-4}$	80.0
	Nozzle_insert			13	$6.8 \cdot 10^{-4}$	39.3
	Lower_cylinder_Housing			58	$7.1 \cdot 10^{-3}$	8.7
	Input_air			8	$3.7 \cdot 10^{-4}$	63.4
	Inlet_particles			7.9	$5.1 \cdot 10^{-4}$	64.3

No resulta trivial establecer una relación directa entre la disminución de tamaño de la boquilla y las tensiones de VM generadas en las mismas, así como en sus FS. Además, estas reducciones no siempre fueron proporcionales por cuestiones de diseño.

Sin embargo, puede observarse como en las piezas `input_water`, `top_flage`, `swirl_insert` o `nozle_insert`, sí se aprecia una reducción de las tensiones de VM con el tamaño, mientras que para el resto de las piezas esta variación no es tan clara. Por ejemplo, en las piezas centrales como son `mixing_chamber1`, `inlet_nozzle`, `mixing_chamber_2`, se reduce ligeramente de escala 1:1 a escala 1:2, pero luego aumenta muy ligeramente de 1:2 a 1:3. En el caso del `outlet_nozzle`, la tensión de VM se reduce de escala 1:1 a escala 1:2, pero de escala 1:2 a escala 1:3 se mantiene.

Por otro lado, en el caso de la carcasa exterior (`lower_cylinder_housing`) las tensiones de VM de escala 1:1 a escala 1:2 aumentan mientras que de escala 1:2 a 1:3 disminuyen por debajo de las de escala 1:1.

Y por último, en las entradas de aire y de partículas apenas varían las tensiones de VM, aumentan ligeramente de la escala 1:1 a la escala 1:2, para luego disminuir quedándose por encima de las de escala 1:1.

En cuanto al FS, vamos a centrar en estudio en las boquillas escaladas, ya que se realizaron con el mismo material. En estas simulaciones se observa como en las piezas centrales `mixing_chamber1`, `inlet_nozzle`, `mixing_chamber_2`, los mayores espesores favorecen un aumento del factor de seguridad en las boquillas de escala 1:2 frente a 1:3.

Sin embargo, para el `top_flage`, pieza muy sensible, tal y como se pudo comprobar a escala 1:1 donde con un aluminio más corriente se supera el límite de seguridad, al no reducirse el espesor de la pieza, pero sí su circunferencia, se obtienen mejores resultados de FS a escala 1:3. Lo mismo sucede, en la pieza del `lower_cylinder_housing`, apenas se ha disminuido el espesor, pero sí el tamaño, con lo que se logra una mejoría en su factor de seguridad en la escala 1:3. El resto de las piezas, en su mayoría, al disminuir el tamaño de las mismas se favorece el FS.

Estos factores han de tenerse en cuenta a la hora de realizar futuros rediseños del sistema. Por regla general, únicamente hay una pieza que presenta problemas el `top_flage` a escala real. Esto se solucionaría eligiendo la AA 7075 – T6 para todos los tamaños. En un correcto funcionamiento, las piezas internas son lo suficientemente robustas como para soportar las tensiones a las que va a estar expuestas las boquillas.

Por lo tanto, la conclusión de este estudio es que los nuevos diseños escalados propuestos con la AA 7075 - T6 cumplen con los requisitos de seguridad para su fabricación a todas las escalas que se requiere. Además, es importante recordar que los valores de límite elástico y resistencia mecánica determinados en esta memoria de investigación demuestran que esta aleación preserva buenas propiedades mecánicas incluso a temperaturas de emergencia.

4.4.2 Boquilla F

A continuación, y siguiendo la misma metodología del apartado anterior, se presentan los resultados obtenidos para el modelo F de boquilla (ver esquema de la boquilla en la Figura 152). Igualmente, en el punto 4.4.2.4 se realiza una comparativa de los resultados obtenidos a las diferentes escalas.

- Boquilla original (escala 1:1): Figura 153 a Figura 164. Como en el caso de la boquilla B, la pieza Top_flage, ha presentado de nuevo problemas en las simulaciones con la AA 6061 -T6, superándose el FS en algunos puntos cerca de la tornillería y bordes.
- Boquilla F 1:2: Figura 165 a Figura 176. En este caso, no se han detectados FS menores de 1 en ninguna de las piezas, mejorándose estos factores al cambiar el material empleado por la AA 7075 - T6.
- Boquilla F 1:3: Figura 177 a Figura 188. Como en el caso anterior, no se supera el límite de seguridad a T_{amb} en ninguna de las piezas bajo las circunstancias desfavorables planteadas.

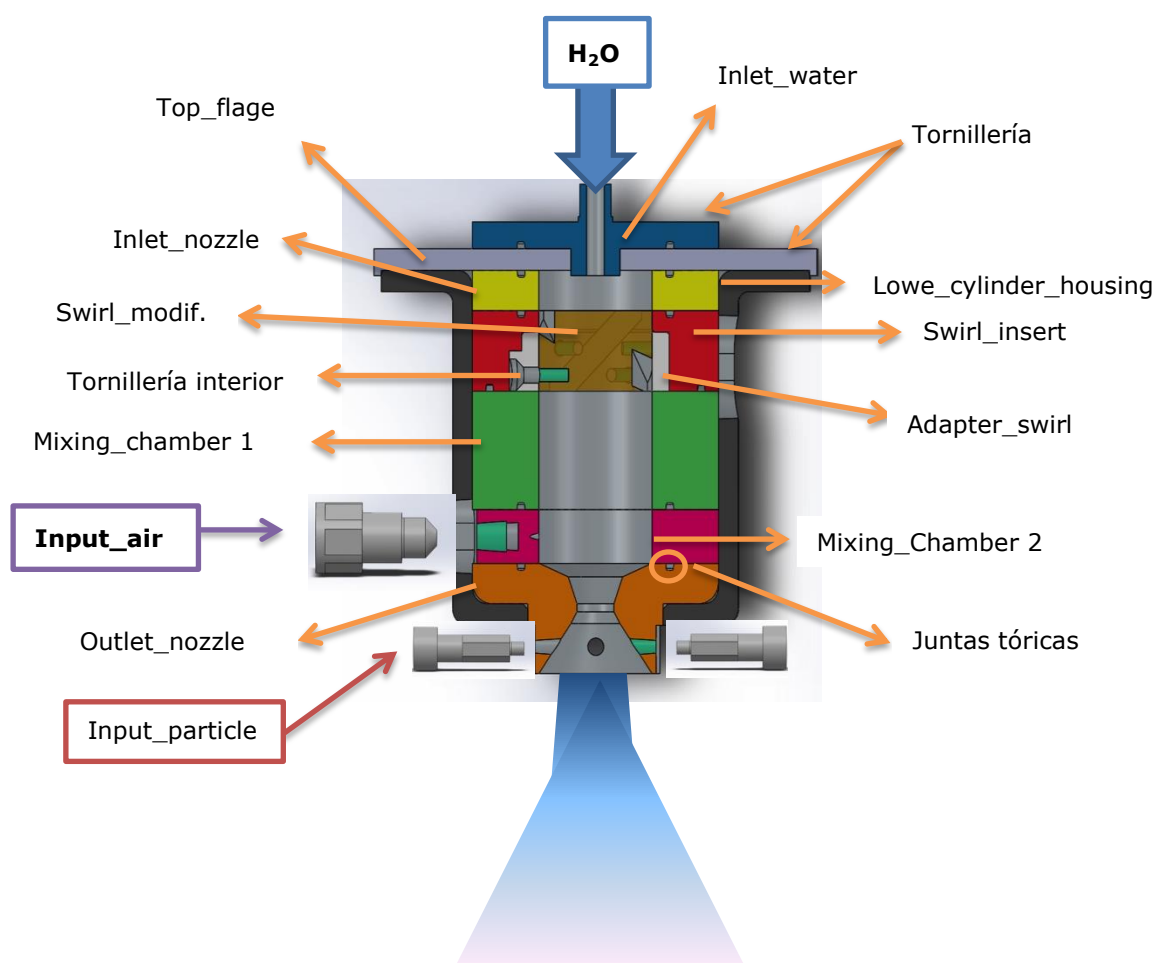


Figura 152. Esquema básico del modelo de boquilla F.

4.4.2.1 Diseño original, escala 1:1

Las simulaciones de cada una de las piezas de la boquilla F a escala 1:1 permiten realizar la representación gráfica de la distribución de presiones (flechas rojas) y las caras tomadas como fijas (flechas verdes), así como las tensiones de VM a consecuencia de la distribución de presiones y el FS de la boquilla. De igual forma que en los casos anteriores, el desplazamiento que sufriría la boquilla está sobredimensionado para que pueda apreciarse.

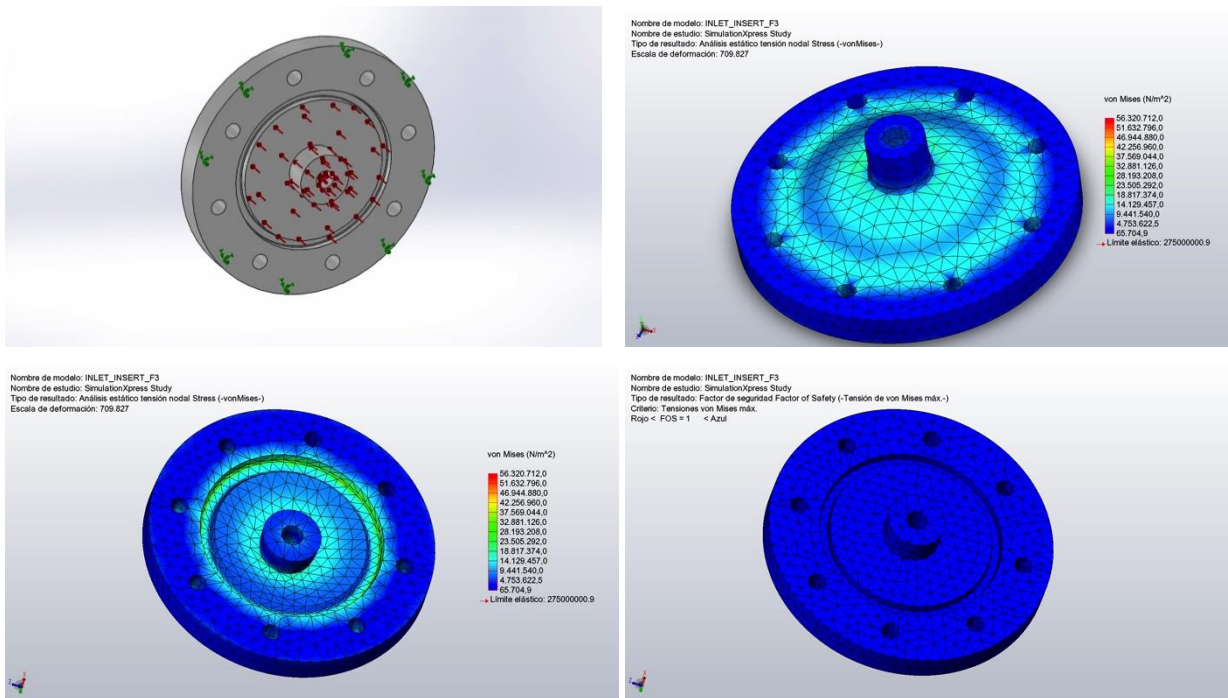


Figura 153. Análisis de tensiones de inlet_water escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es $FS = 4.9$.

En el top_flage (Figura 154), como ocurría con el modelo B de boquilla, para las condiciones adversas propuestas en algunas zonas, tornillería por ejemplo, el FS es menor de 1. Lo que quiere decir que se supera el límite elástico del material.

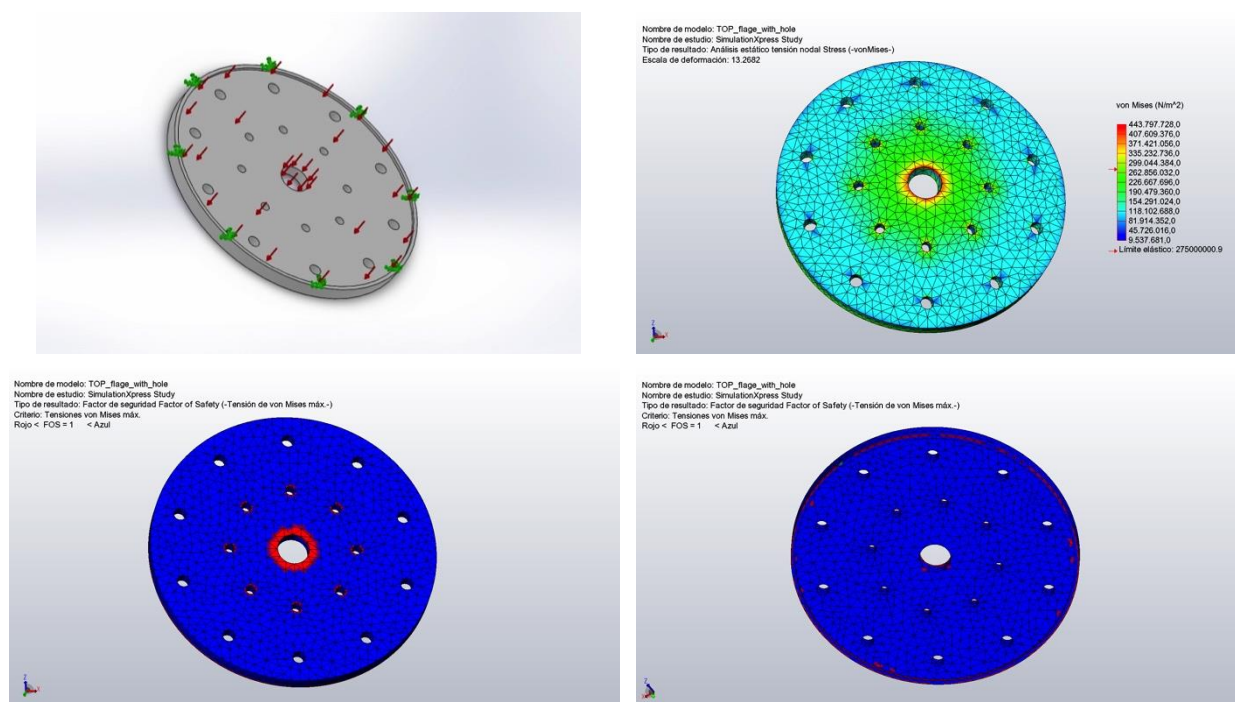


Figura 154. Análisis de tensiones de top_flage escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 0.6.

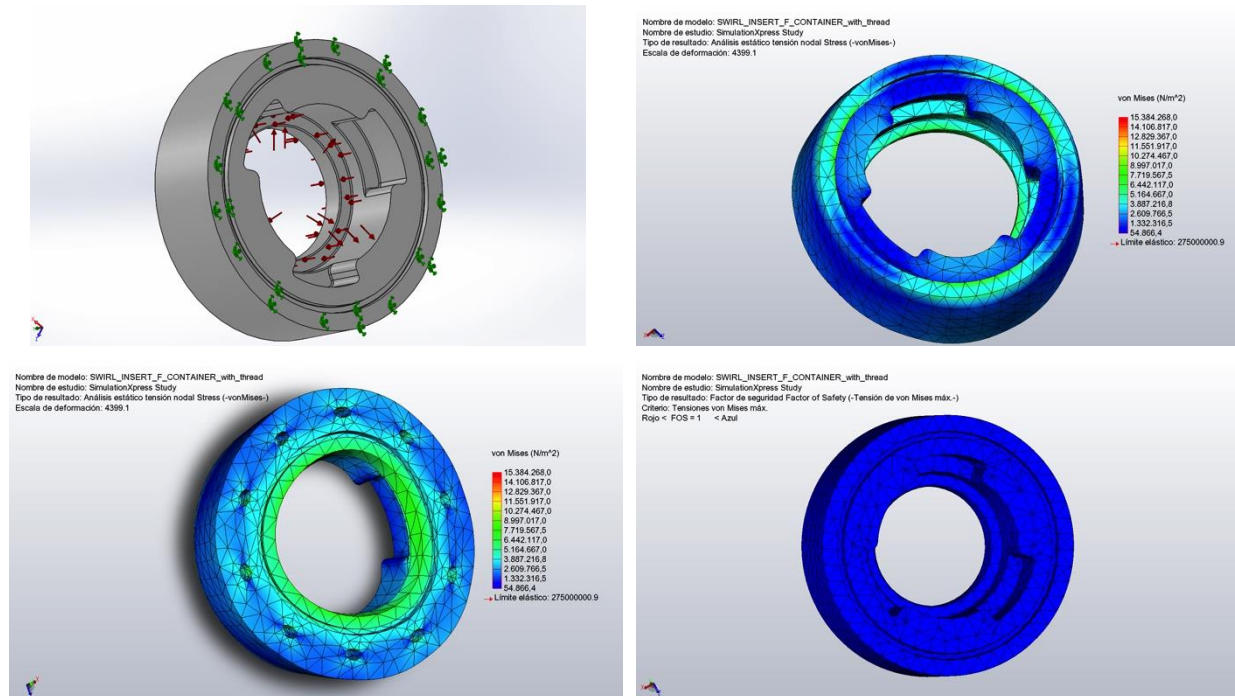


Figura 155. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 17.9.

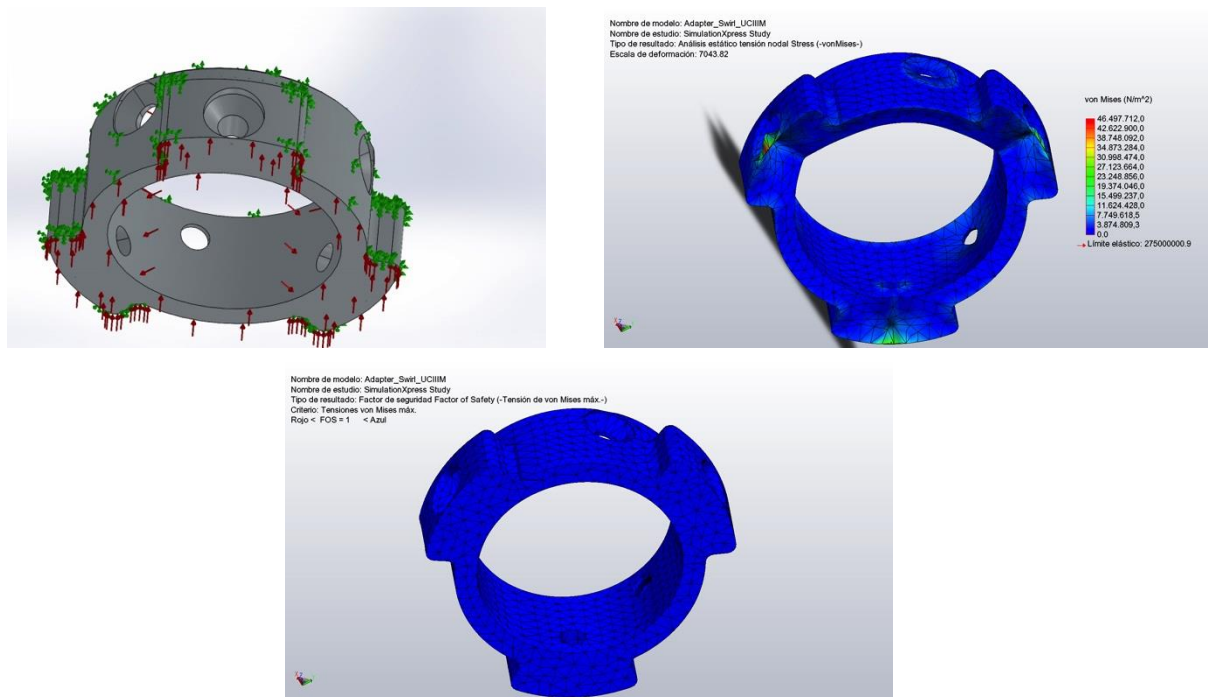


Figura 156. Análisis de tensiones de adapter_swirl escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 5.9.

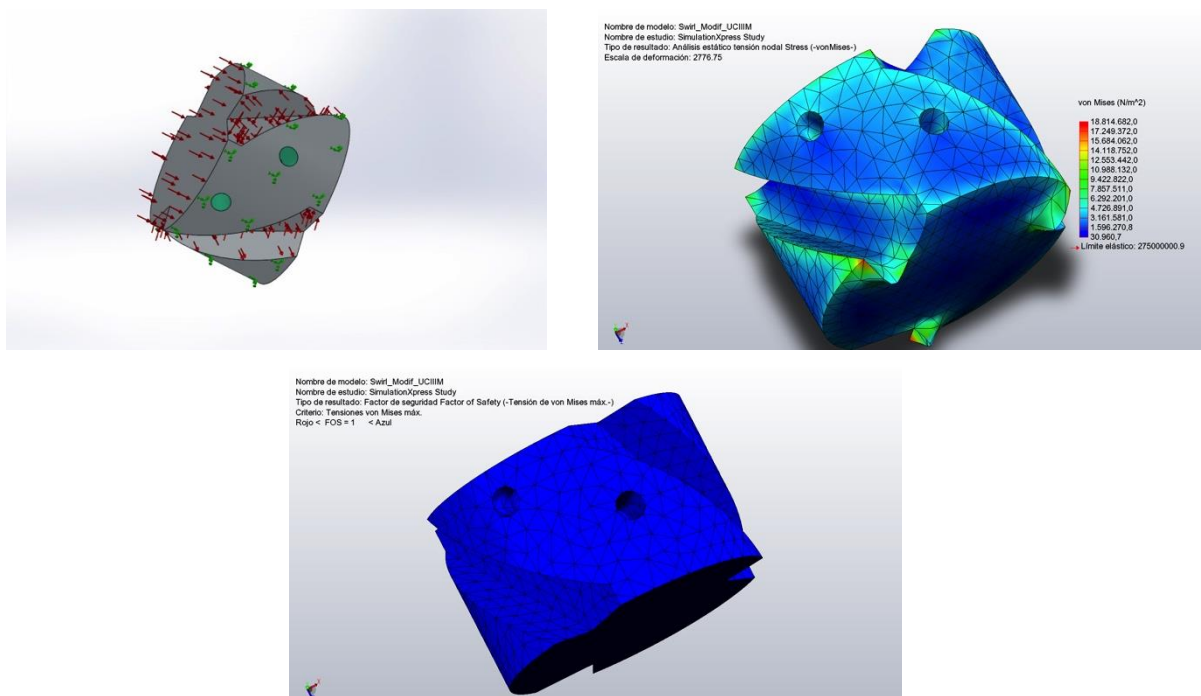


Figura 157. Análisis de tensiones de swirl_modif escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 14.6.

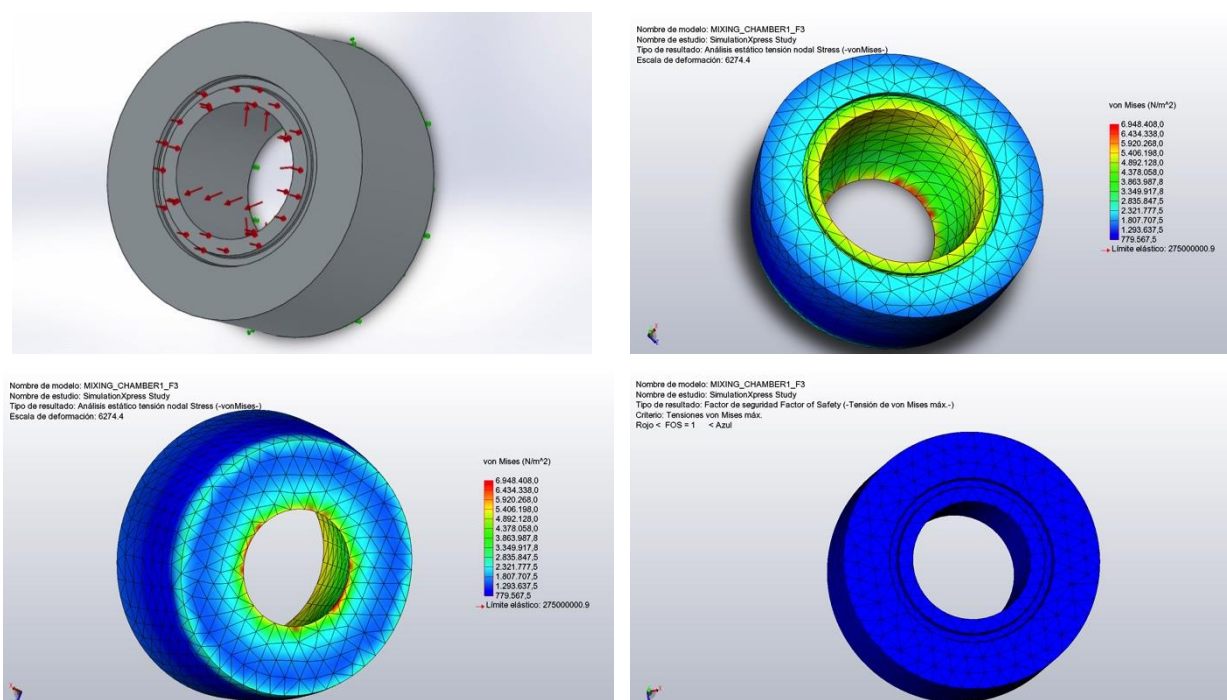


Figura 158. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 39.6.

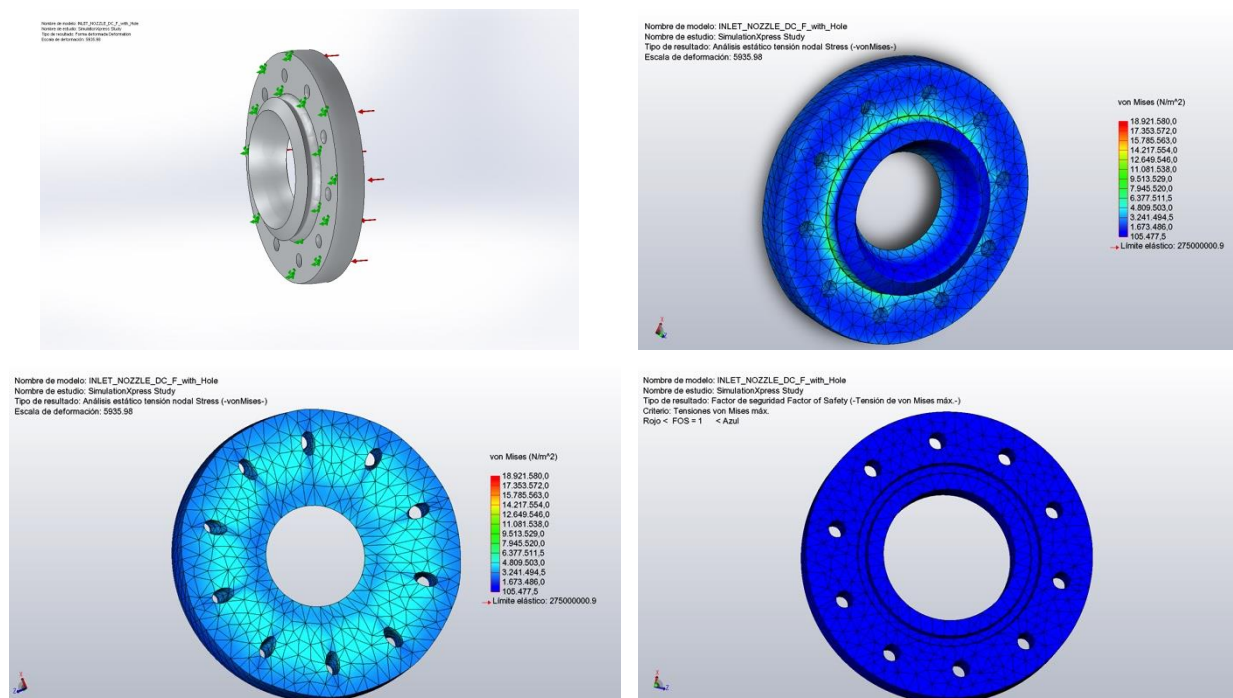


Figura 159. Análisis de tensiones de inlet_nozzler escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 14.5.

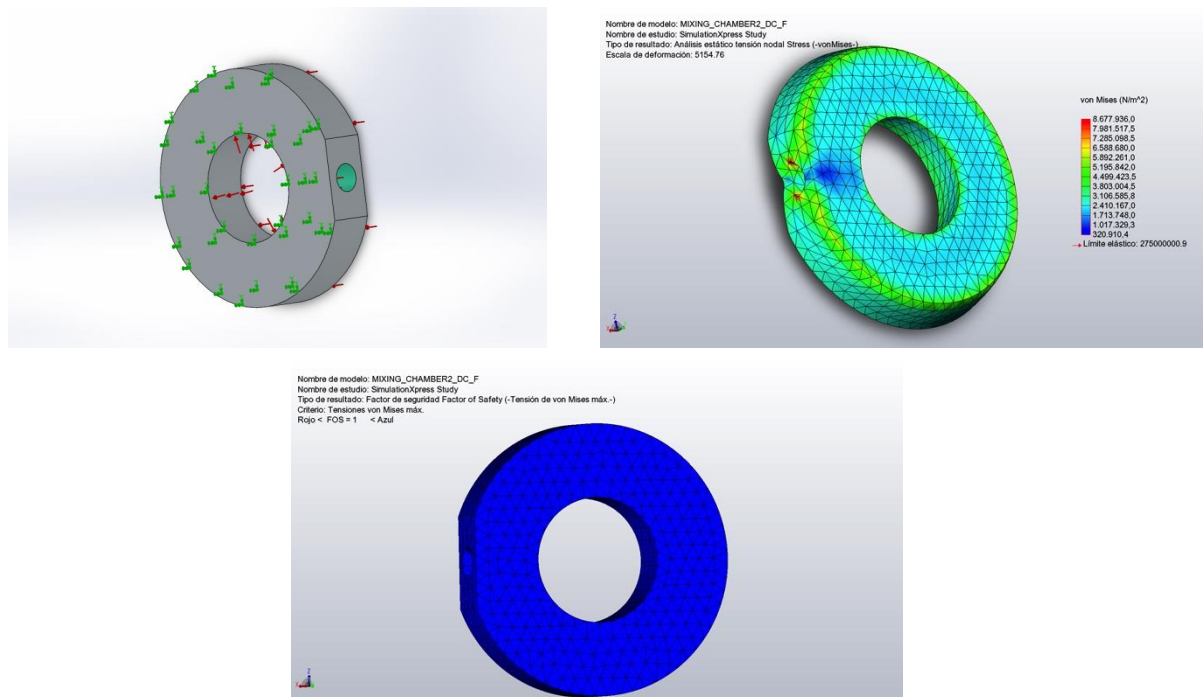


Figura 160. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 31.7.

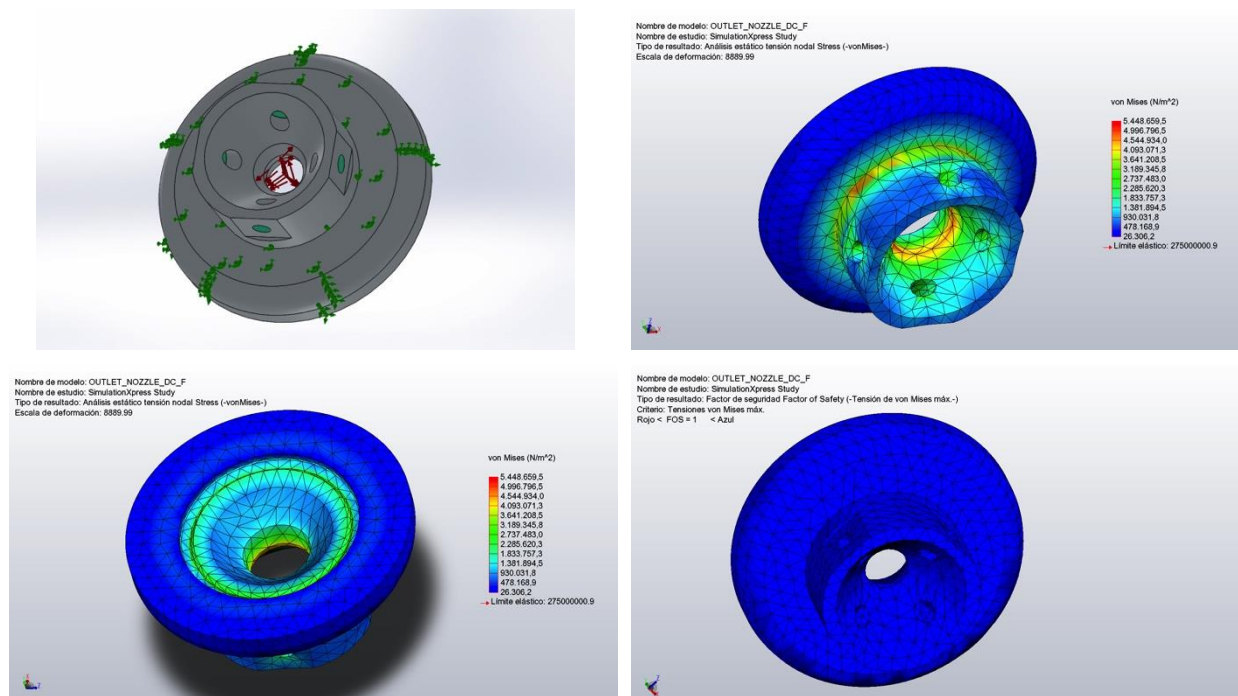


Figura 161. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 50.5.

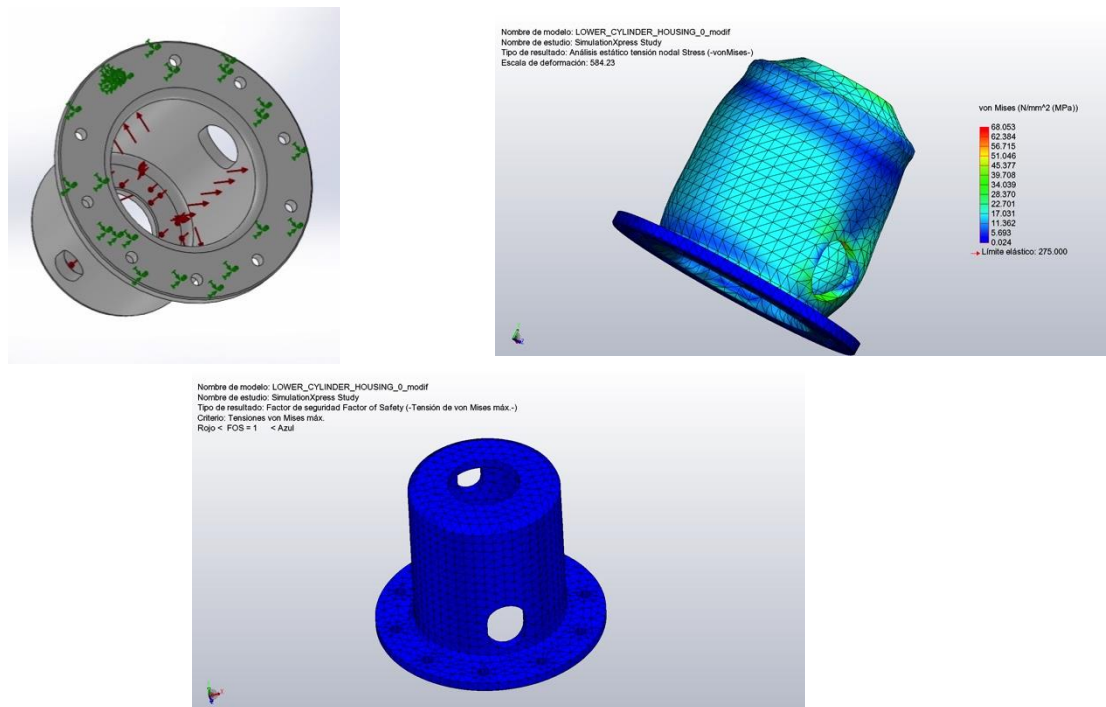


Figura 162. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 4.0.

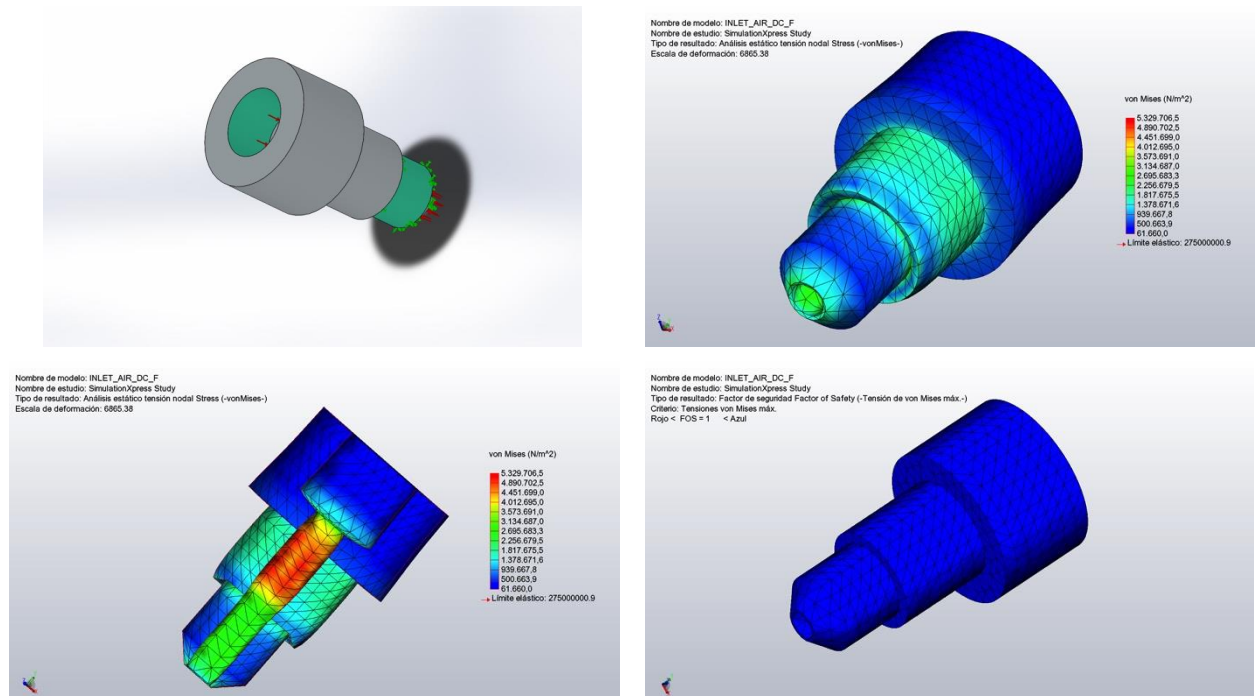


Figura 163. Análisis de tensiones de input_air escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 51.6.

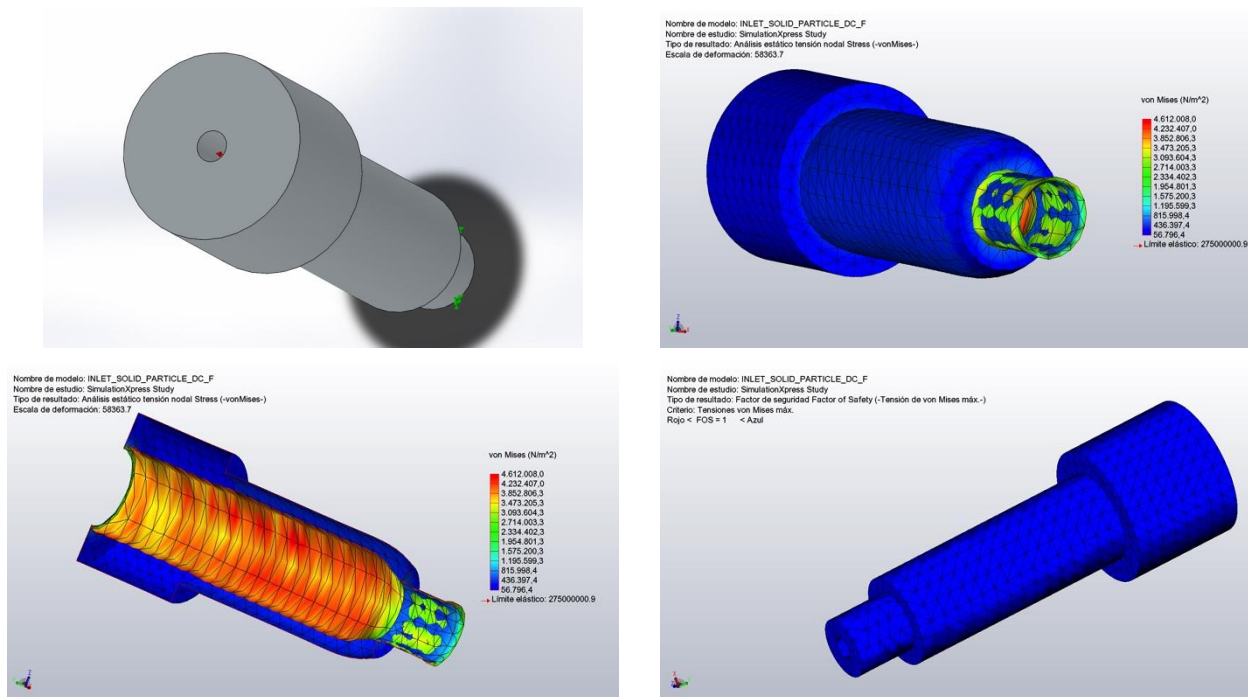


Figura 164. Análisis de tensiones de Inlet_particles escala 1:1. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 59.6.

4.4.2.2 Escala 1:2

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones de cada una de las piezas de la boquilla F a escala 1:2. Como en el caso anterior, se presenta la distribución de presiones (flechas rojas) y las caras tomadas como fijas (flechas verdes), así como las tensiones de Von Mises a consecuencia de la distribución de presiones y el factor de seguridad de la boquilla. Recordar que el desplazamiento de las piezas de la boquilla está sobredimensionado para que pueda apreciarse fácilmente.

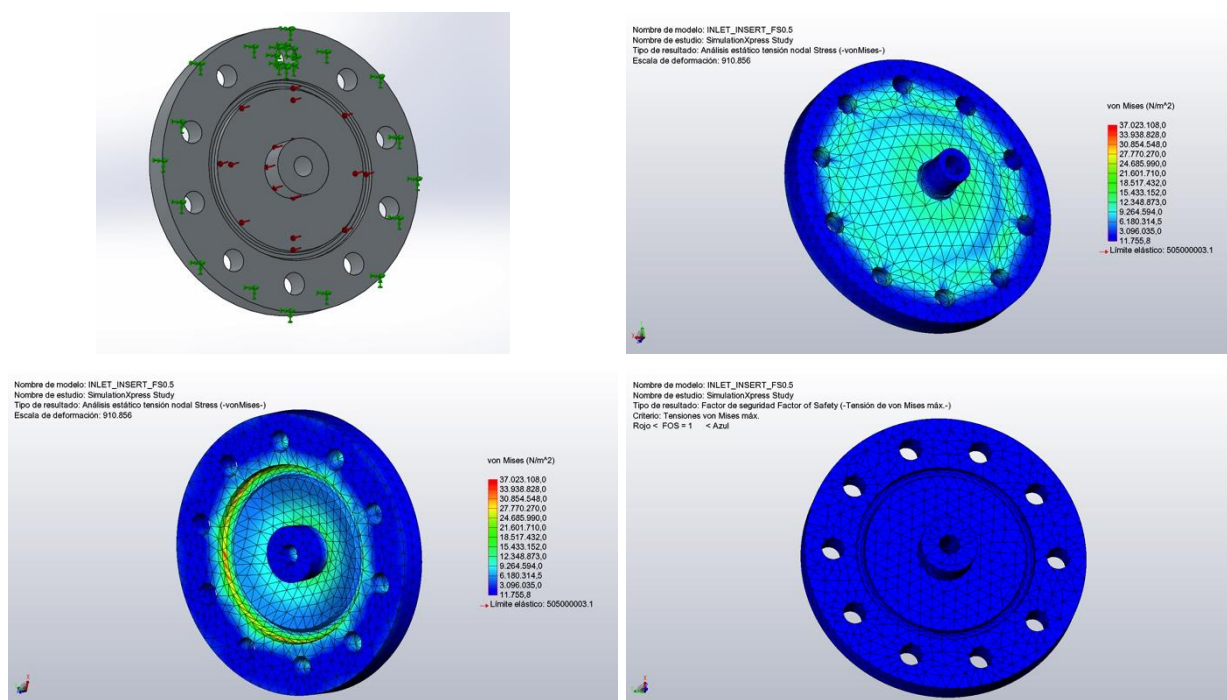


Figura 165. Análisis de tensiones de inlet_water escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 13.6.

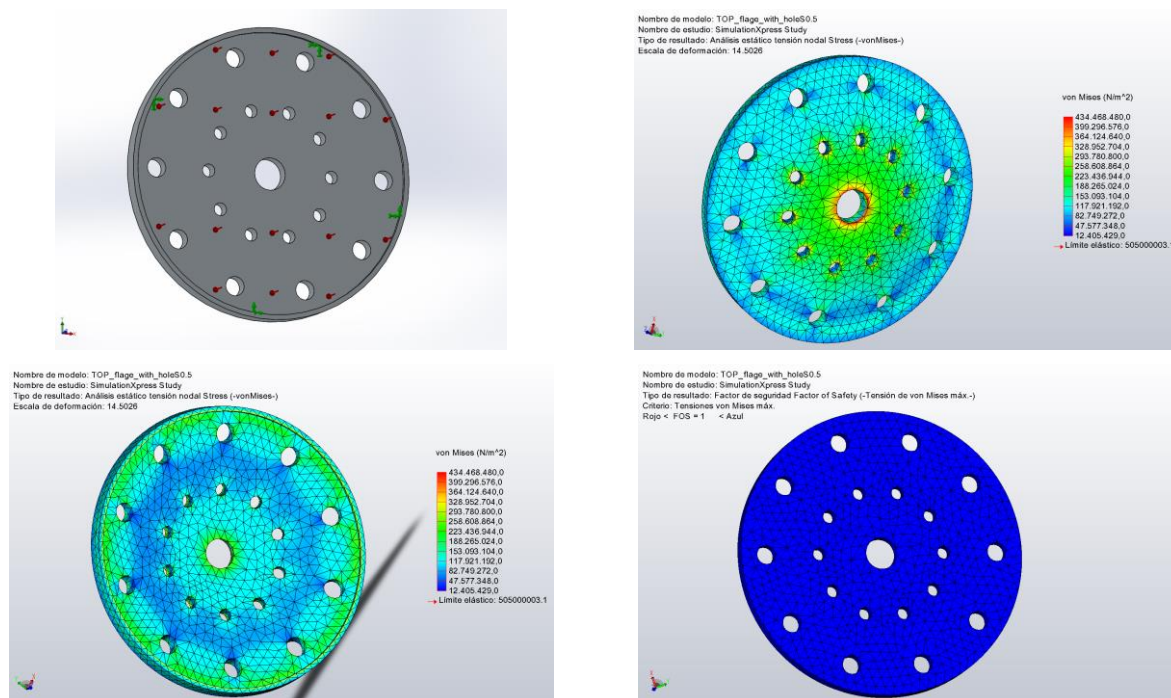


Figura 166. Análisis de tensiones de top_flage escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 1.2.

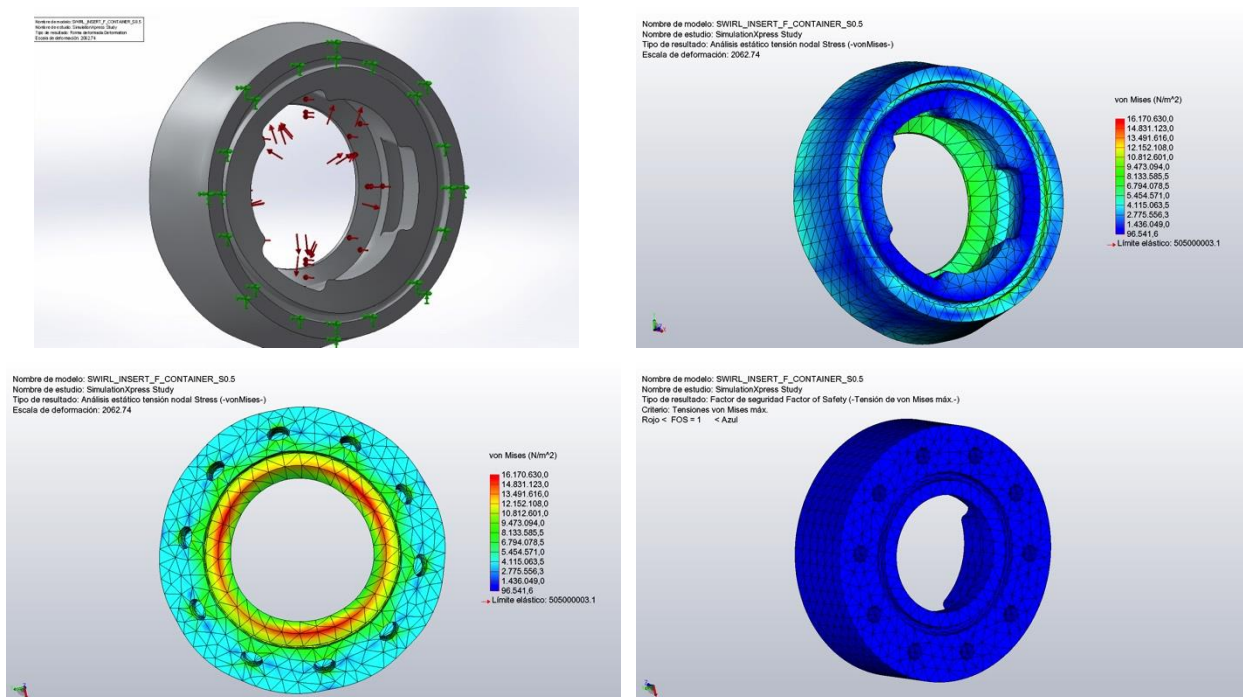


Figura 167. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 31.2.

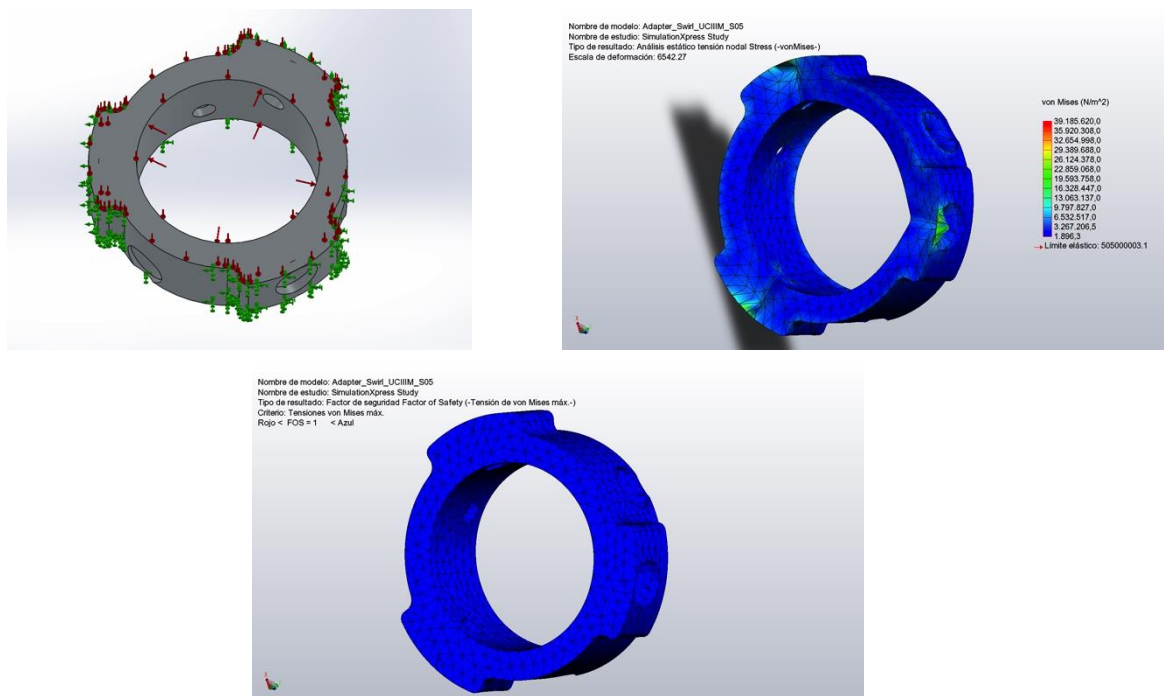


Figura 168. Análisis de tensiones de adapter_swirl escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 12.9.

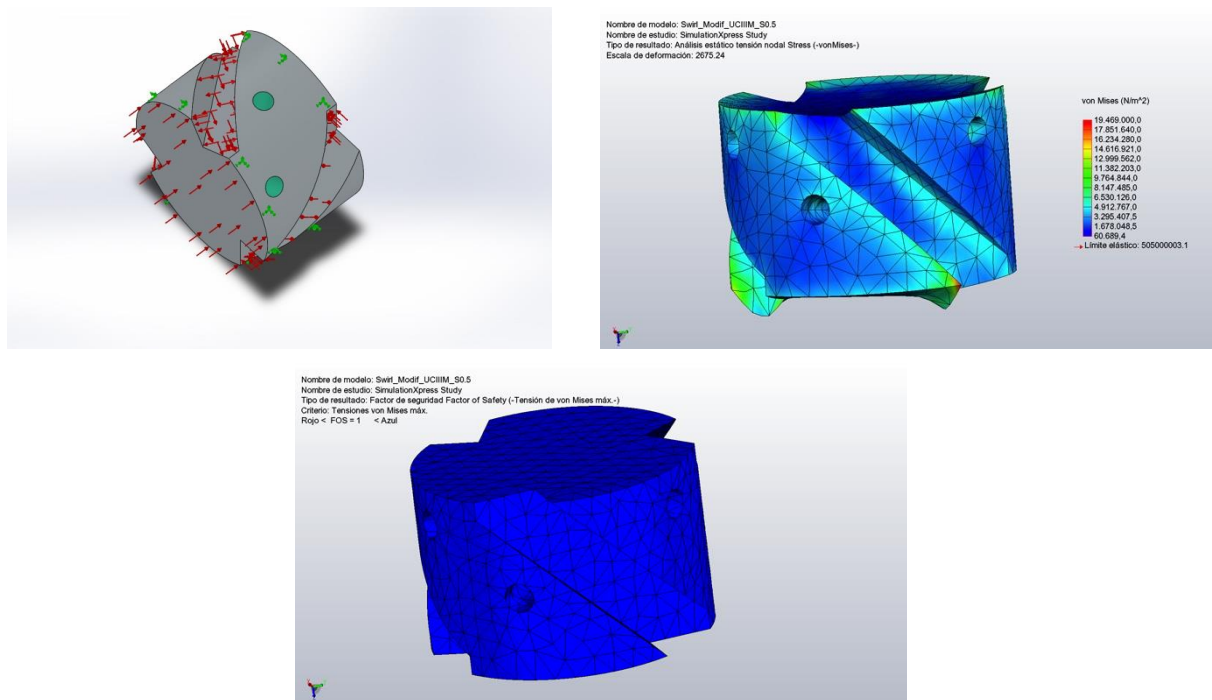


Figura 169. Análisis de tensiones de swirl_modif escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 25.9.

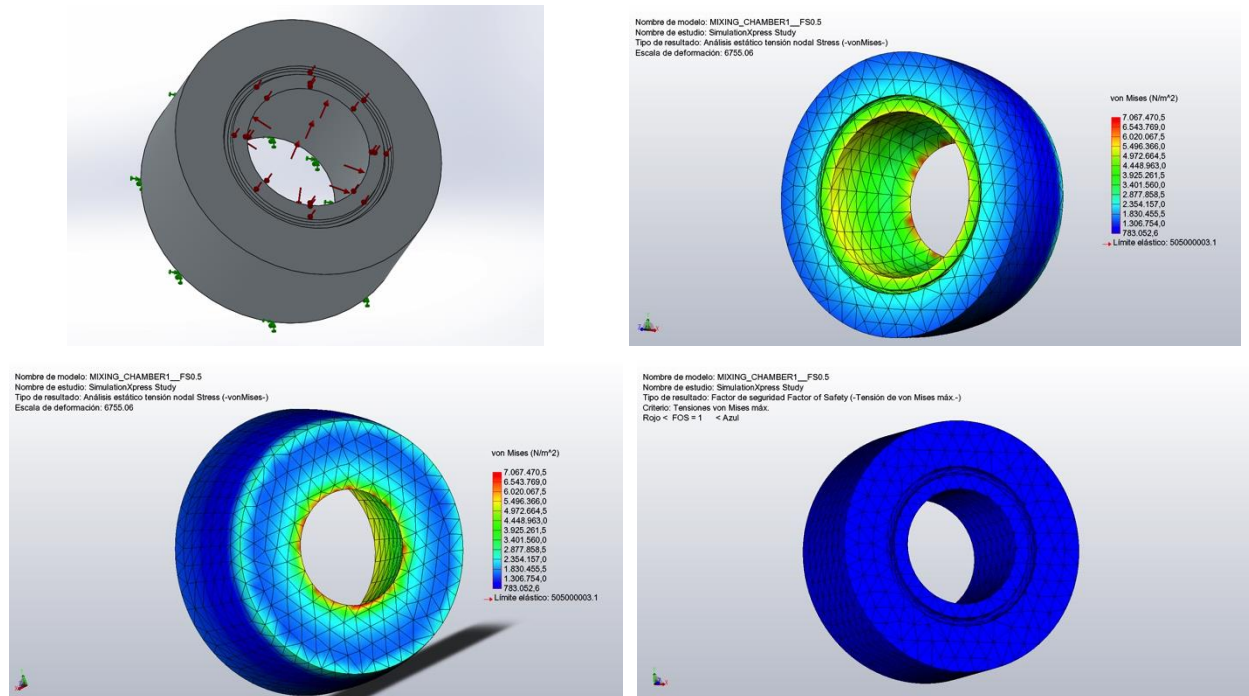


Figura 170. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 71.4.

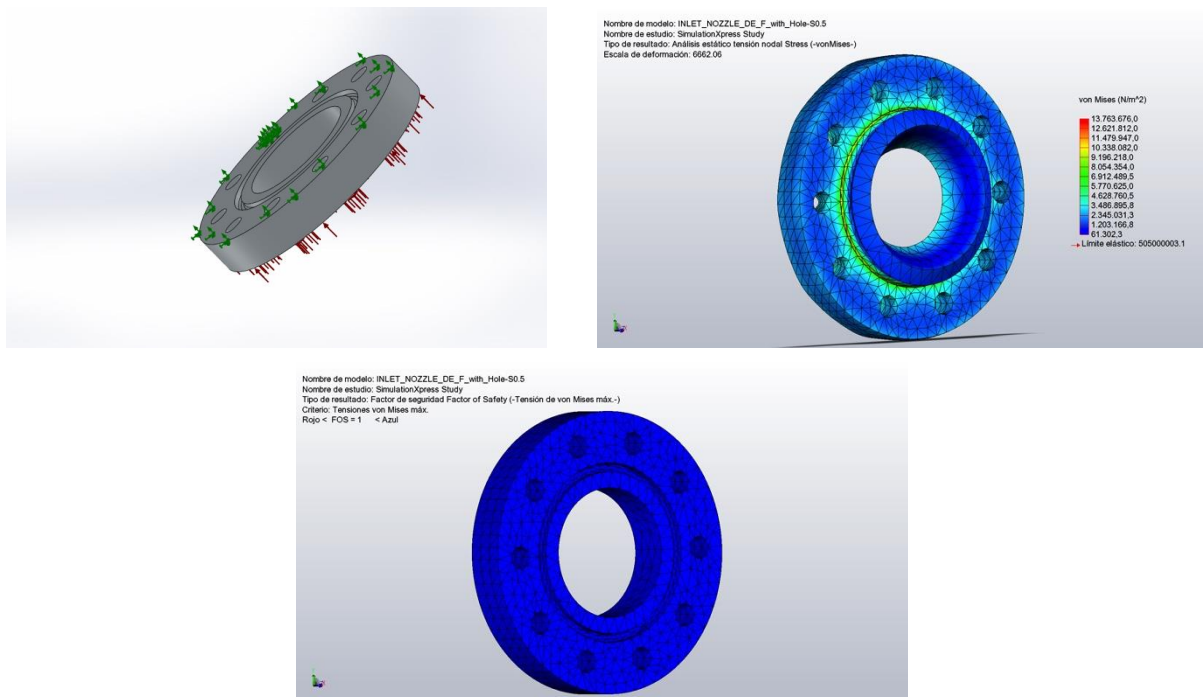


Figura 171. Análisis de tensiones de inlet_nozzle escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es $FS = 37.7$.

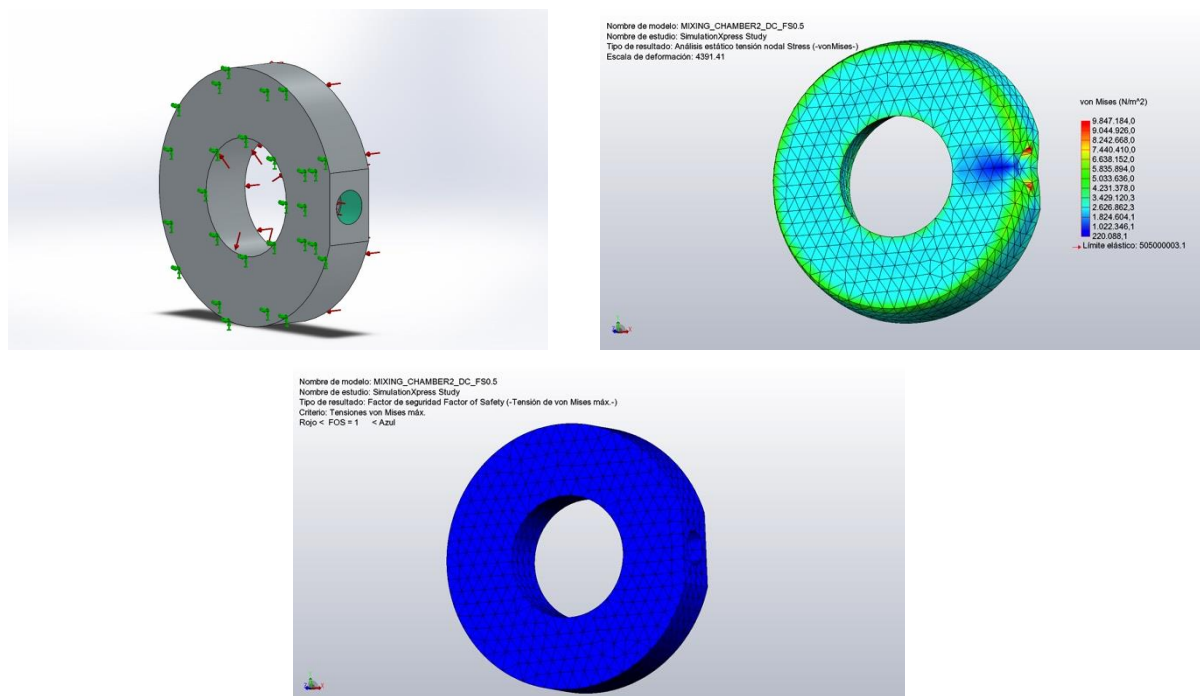


Figura 172. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es $FS = 51.3$.

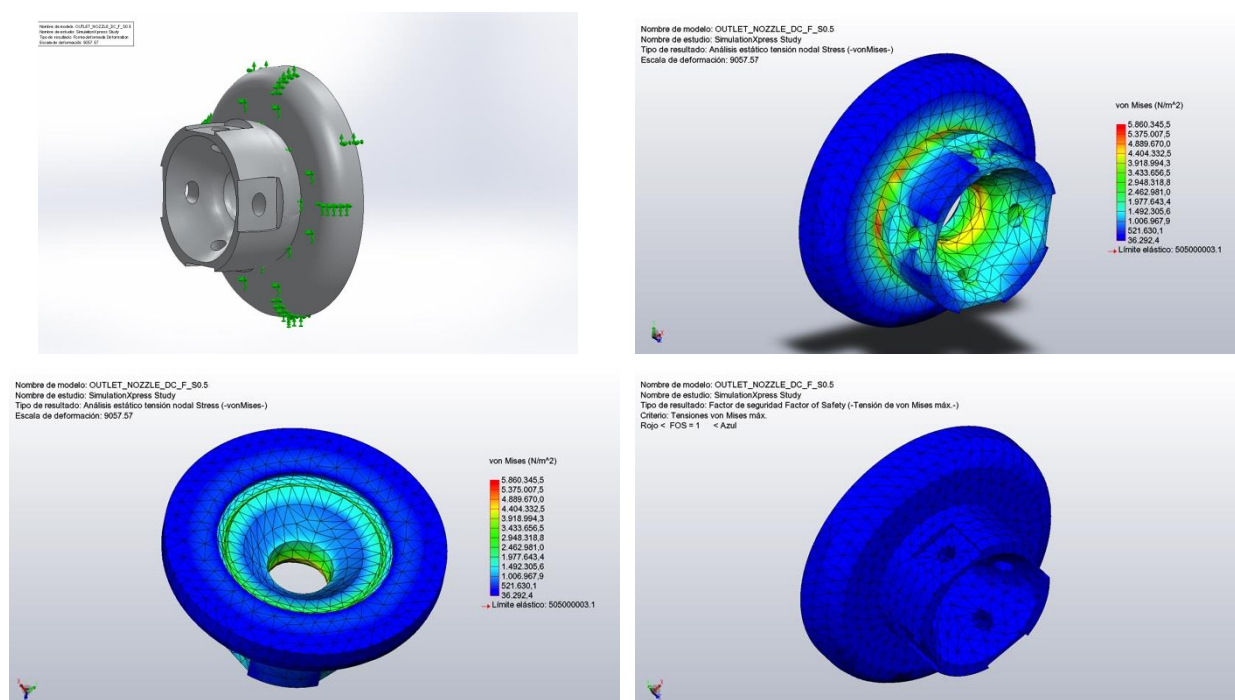


Figura 173. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 85.6.

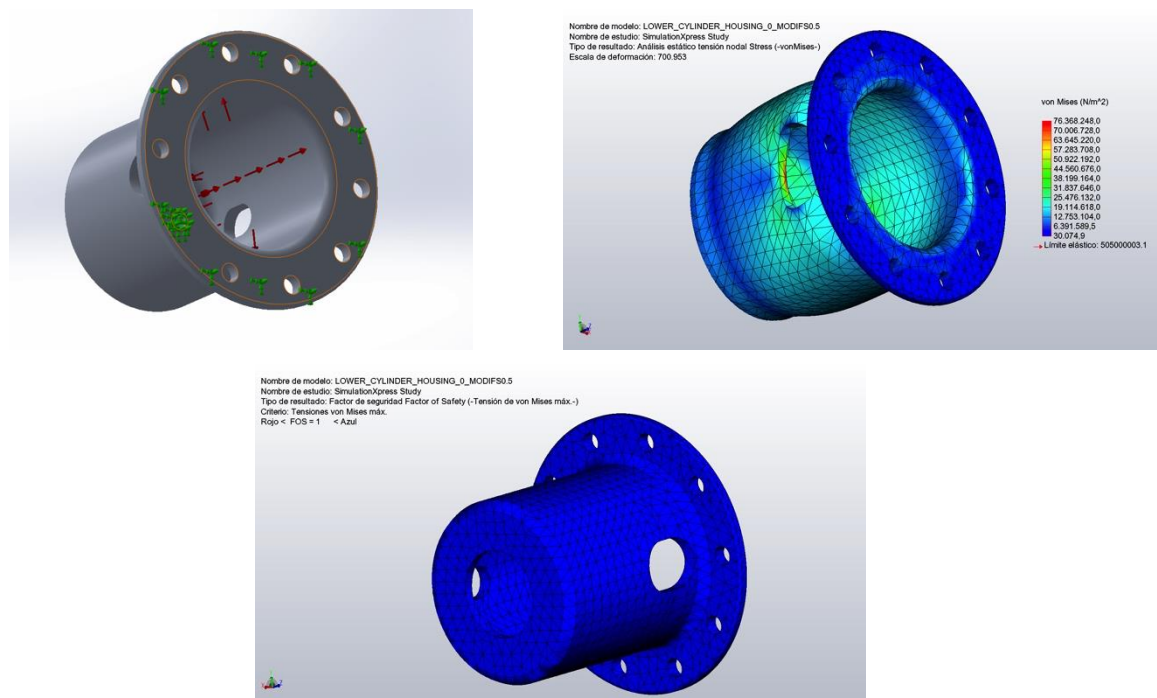


Figura 174. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 6.6.

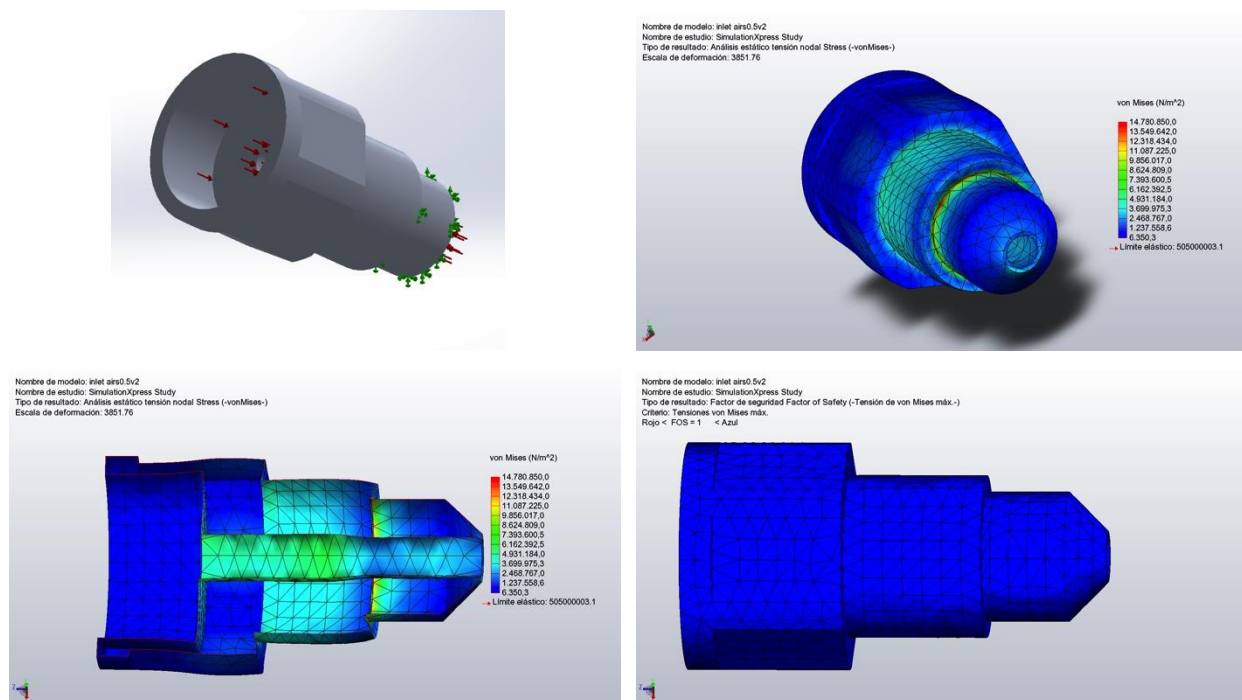


Figura 175. Análisis de tensiones de input_air escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 34.2.

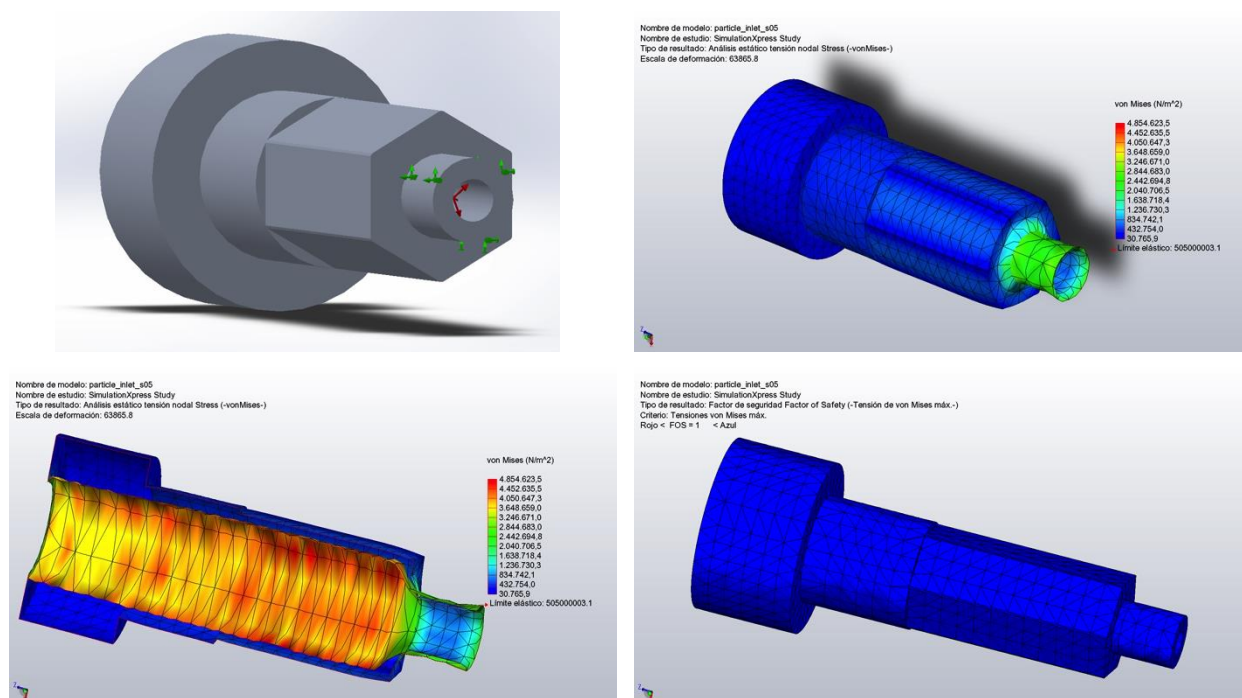


Figura 176. Análisis de tensiones de inlet_particles escala 1:2. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 104.

4.4.2.3 Escala 1:3

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones de cada una de las piezas de la boquilla F a escala 1:3. Se presentan, como en el caso anterior, la distribución de presiones (flechas rojas) y las caras tomadas como fijas (flechas verdes), así como las tensiones de VM a consecuencia de la distribución de presiones y el FS de la boquilla. De nuevo recordar que el desplazamiento de las piezas de la boquilla está sobredimensionado para que pueda apreciarse fácilmente.

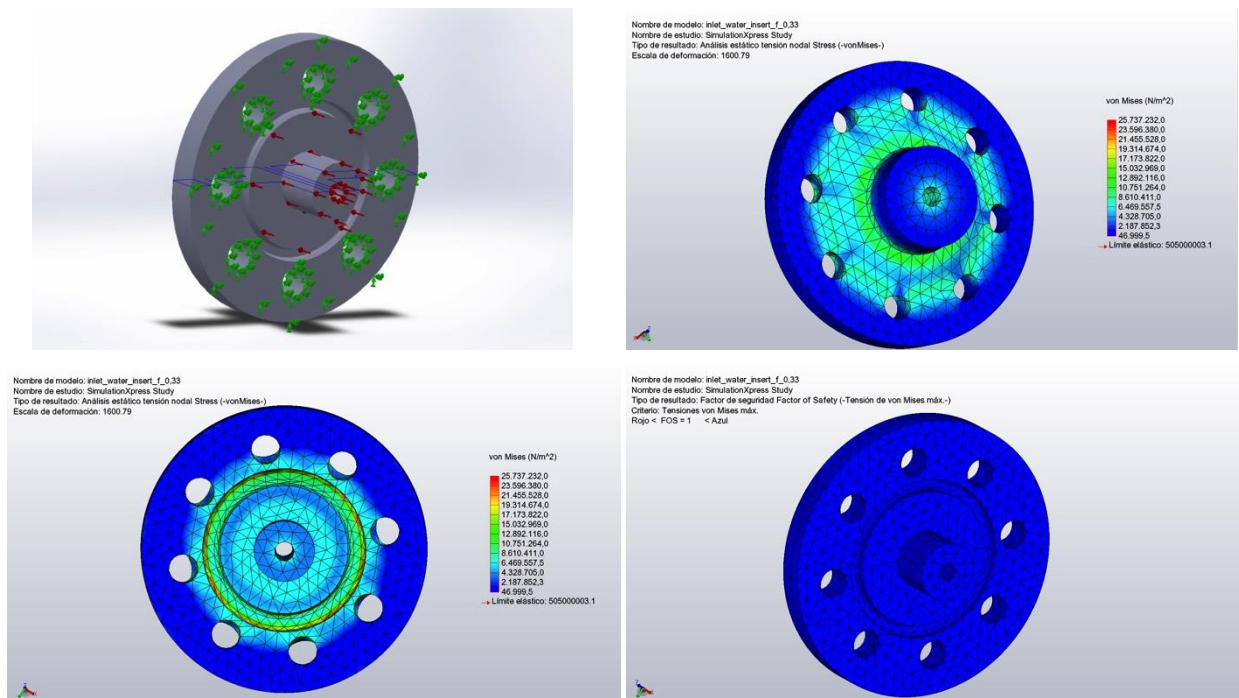


Figura 177. Análisis de tensiones de inlet_water escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 19.6.

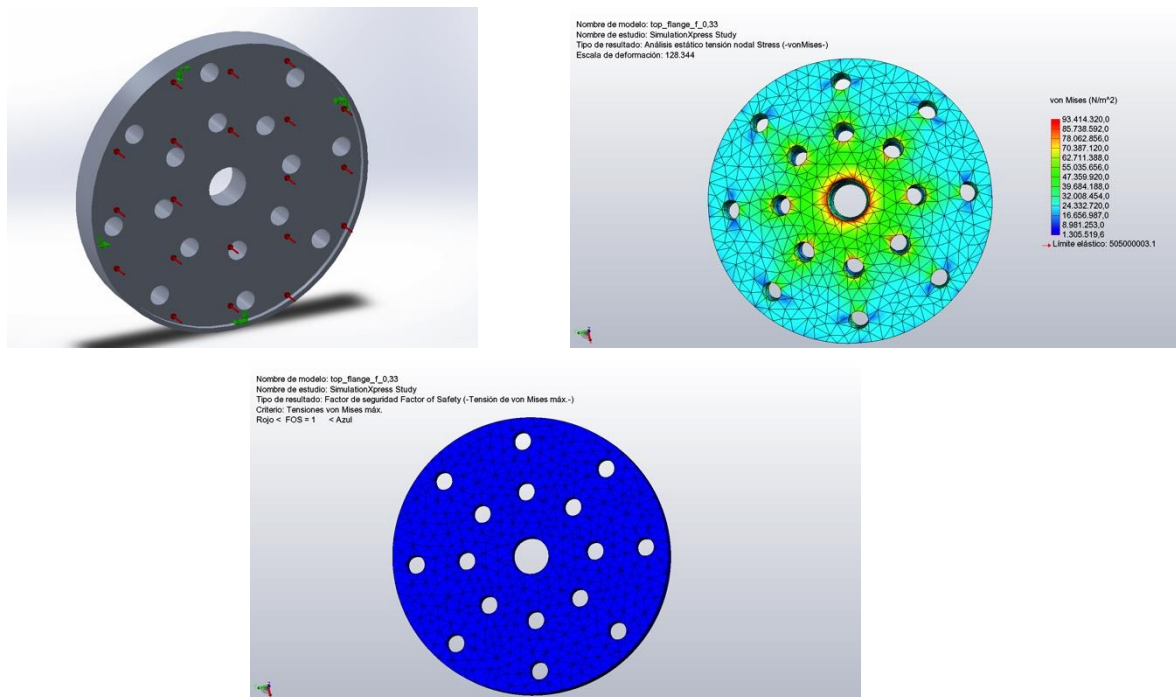


Figura 178. Análisis de tensiones de top_flange escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 5.4.

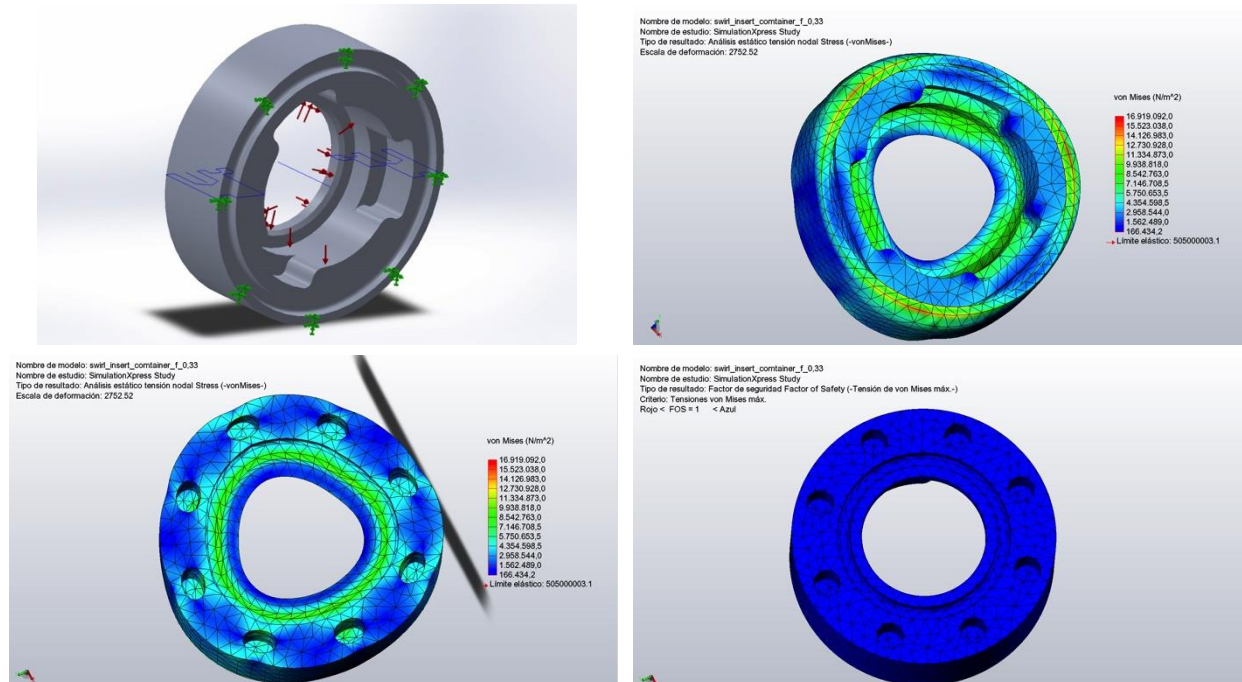


Figura 179. Análisis de tensiones de swirl_insert escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 29.8.

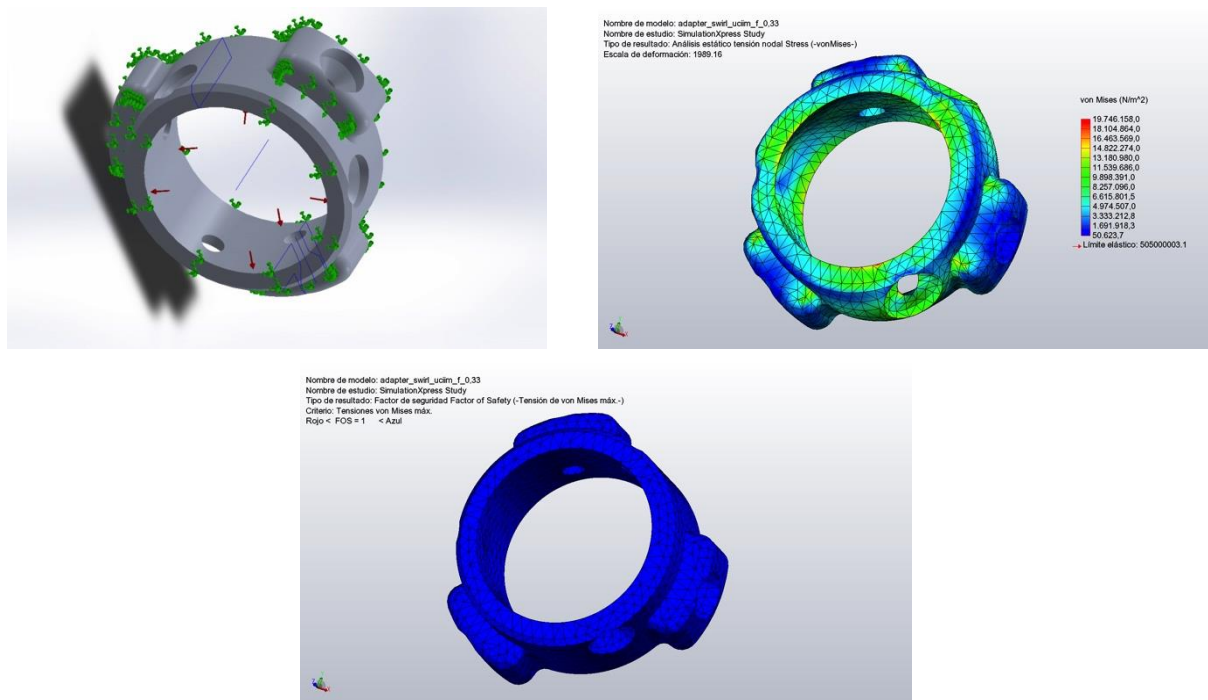


Figura 180. Análisis de tensiones de adapter_swirl escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 25.6.

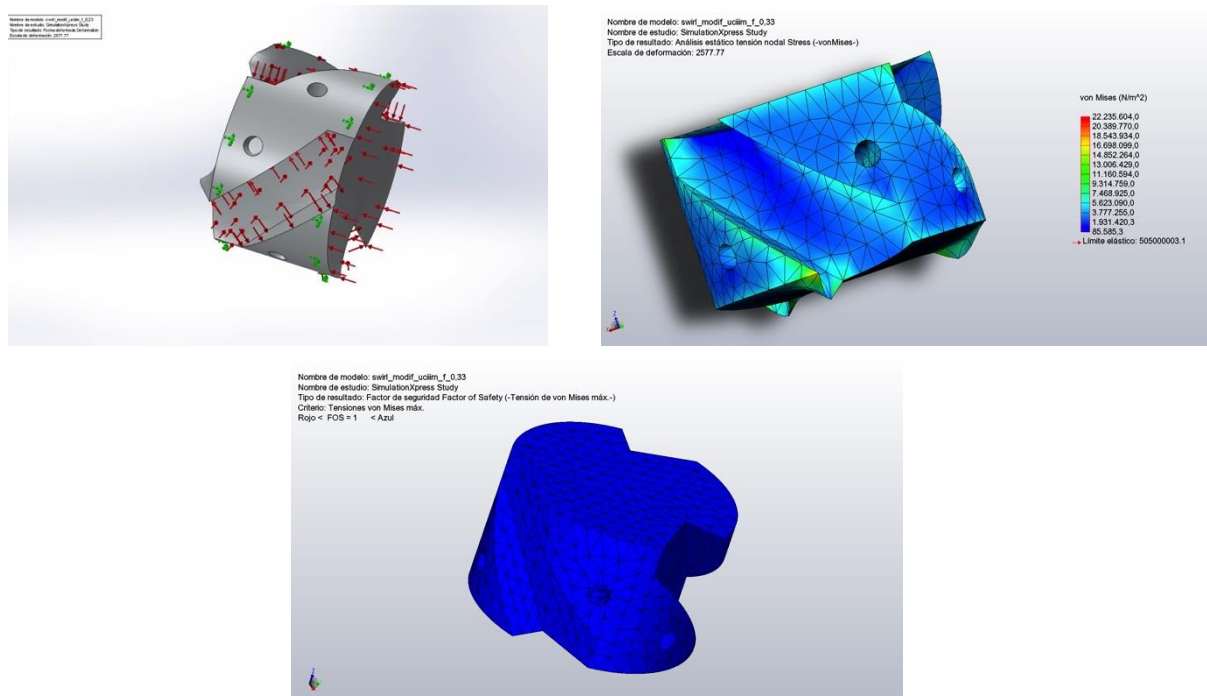


Figura 181. Análisis de tensiones de swirl_modif escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 22.7.

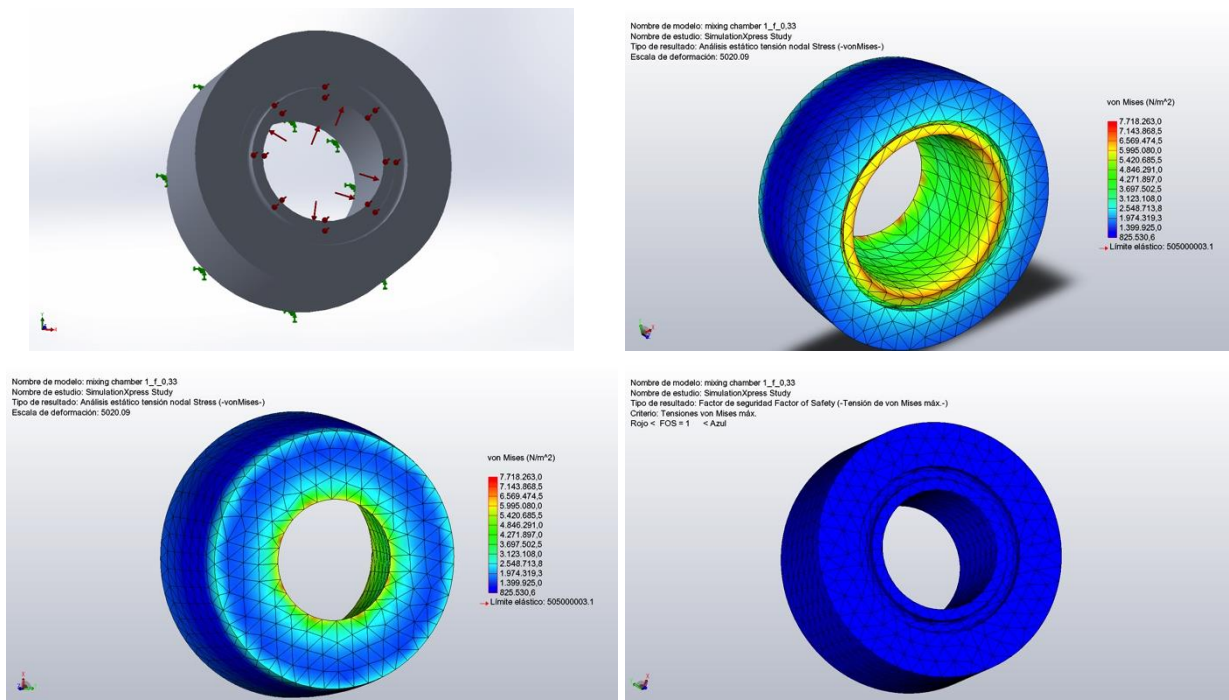


Figura 182. Análisis de tensiones de mixing_chamber 1 escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 65.4.

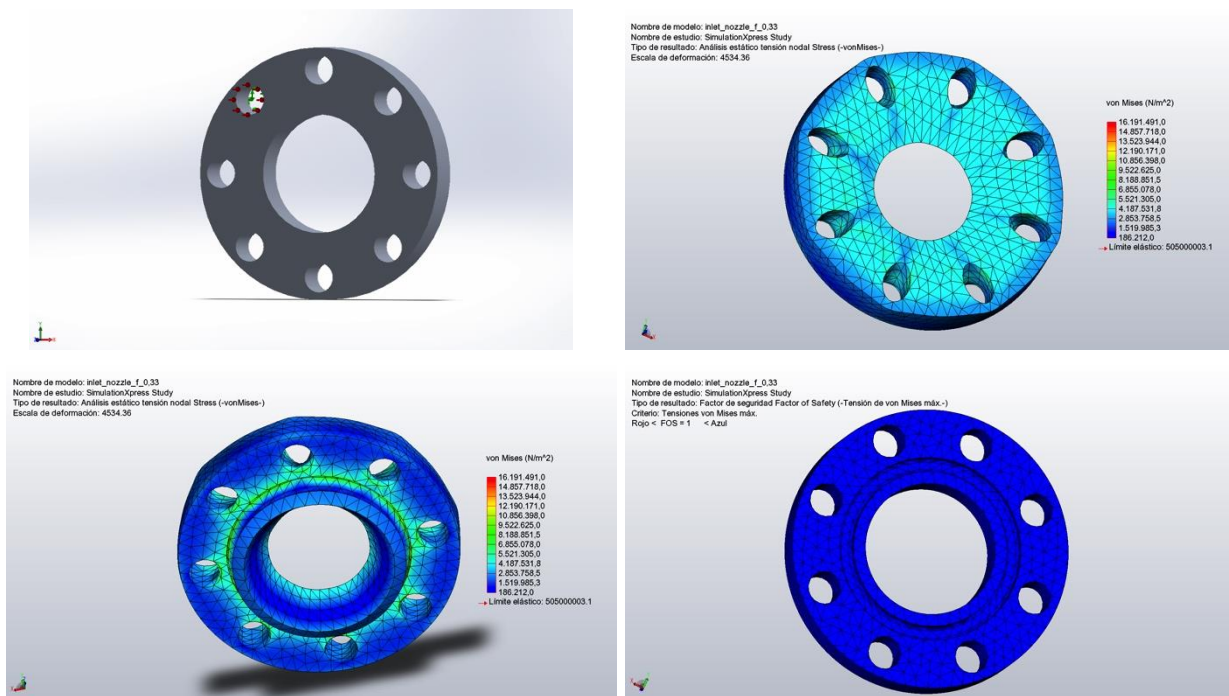


Figura 183. Análisis de tensiones de inlet_nozzle escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 31.2.

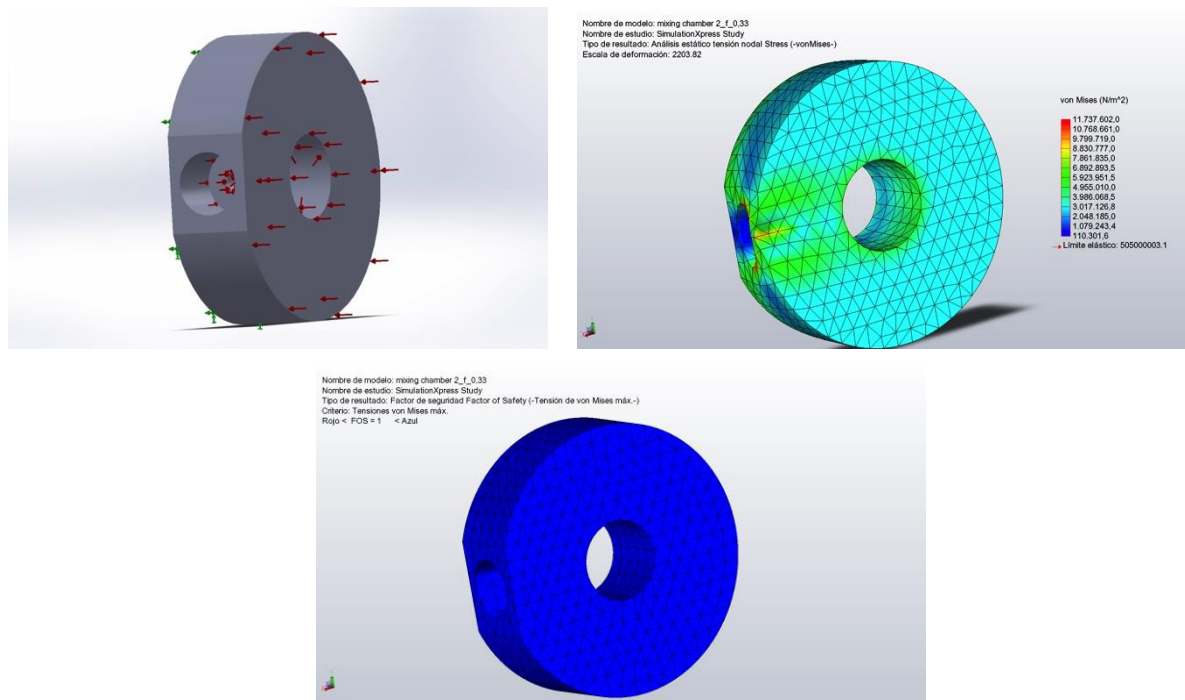


Figura 184. Análisis de tensiones de mixing_chamber 2 escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 43.0.

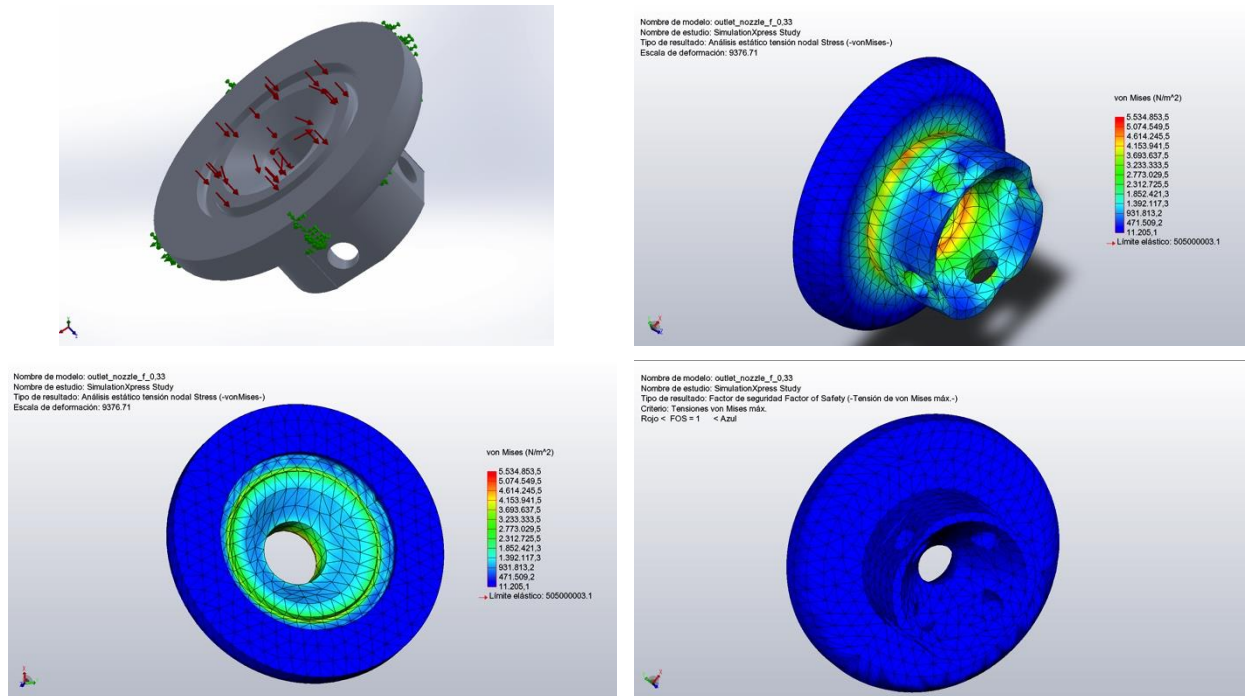


Figura 185. Análisis de tensiones de outlet_nozzle escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 91.2.

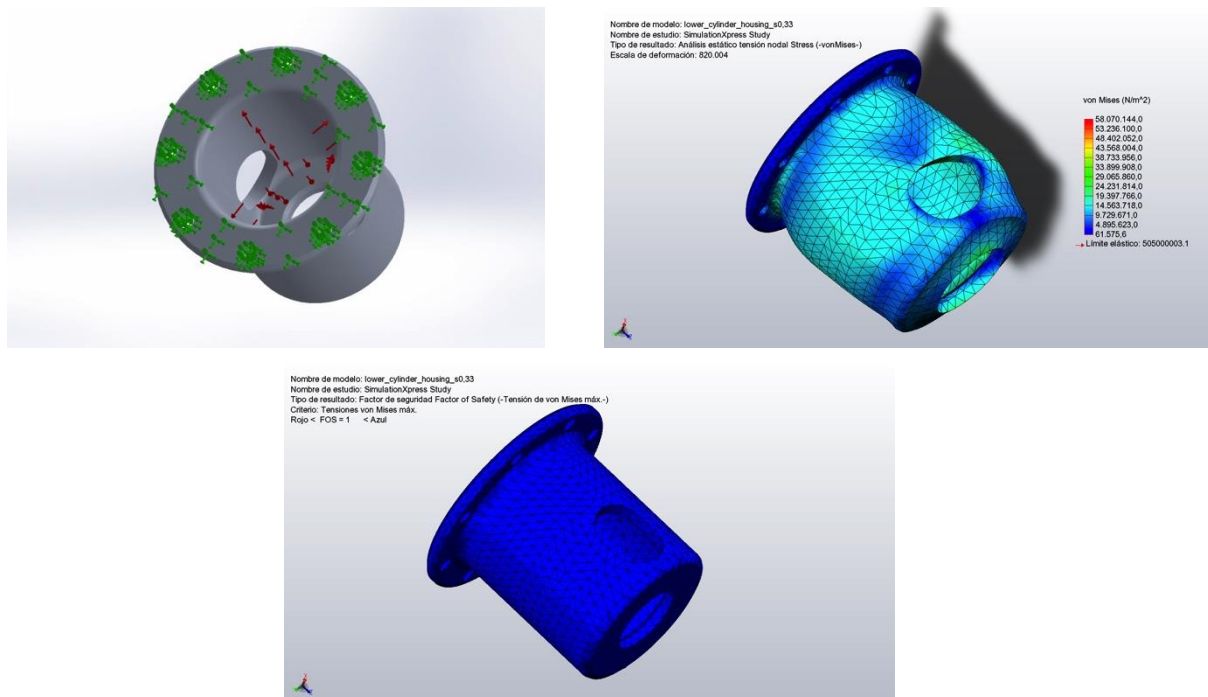


Figura 186. Análisis de tensiones de lower_cylinder_housing escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es $FS = 7.7$.

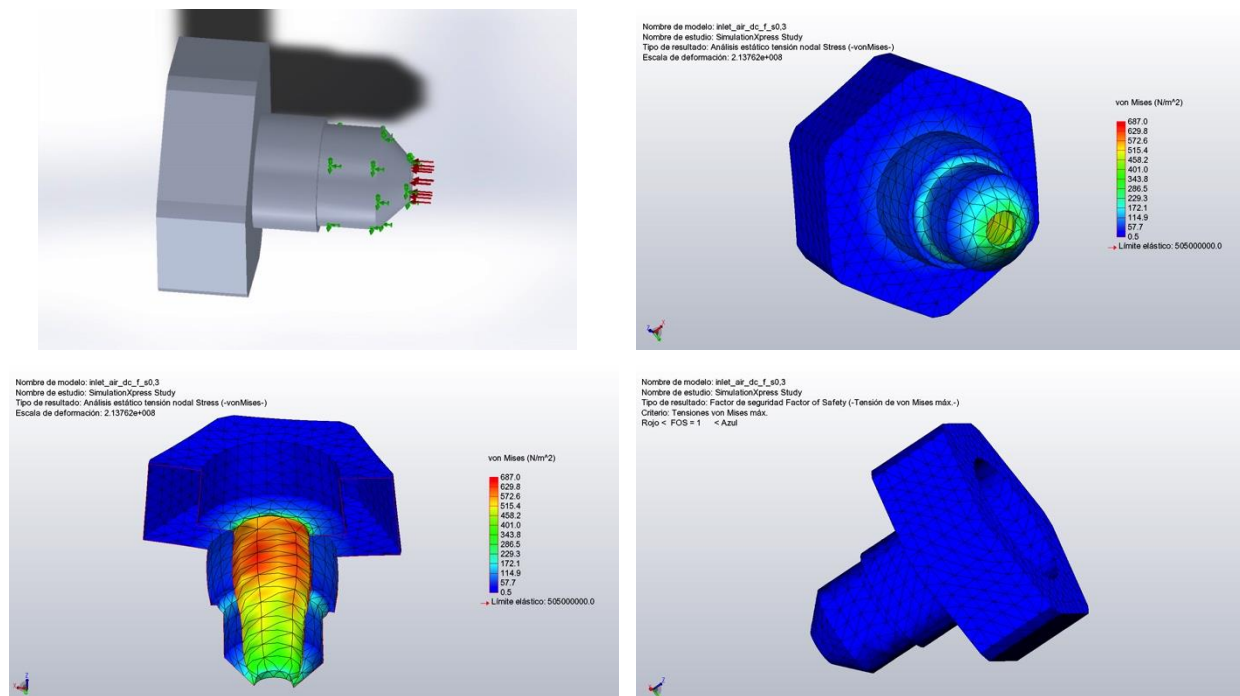


Figura 187. Análisis de tensiones de input_air escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es $FS = 36.9$.

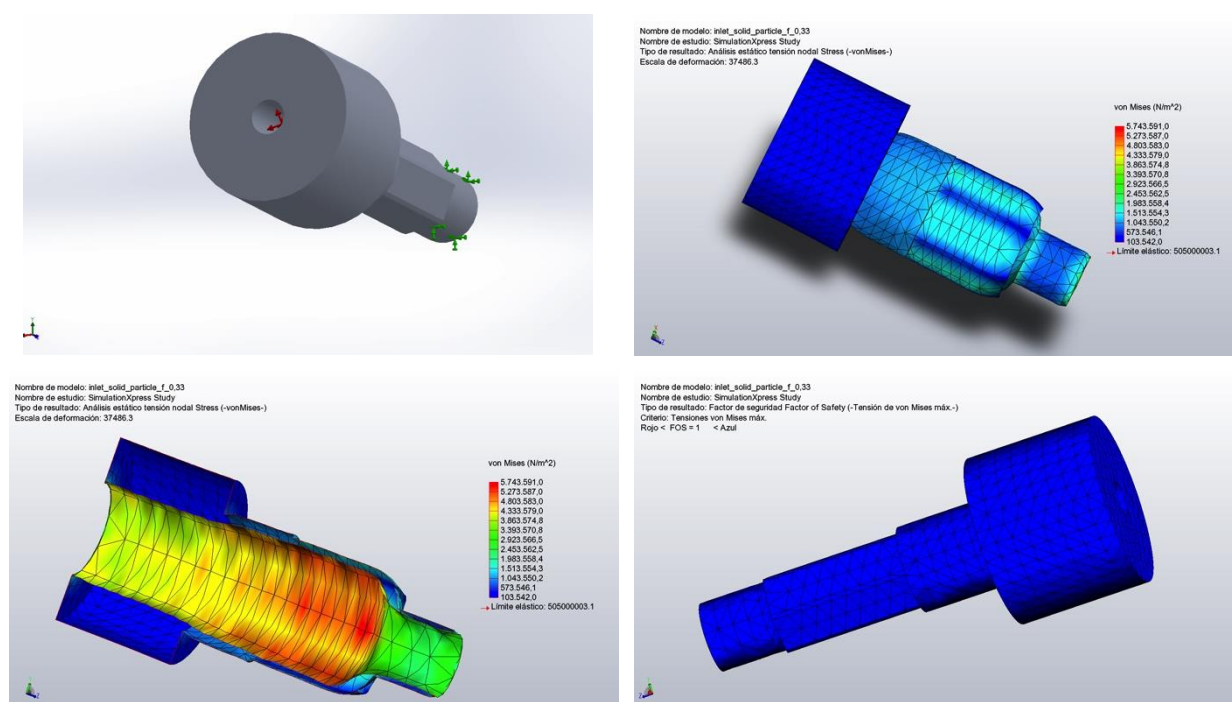


Figura 188. Análisis de tensiones de Inlet_particles escala 1:3. Se muestran las caras fijas y las presiones internas, la distribución de tensiones VM generadas por los fluidos a 2.5 MPa en las distintas caras de la pieza y su FS. En este caso en mínimo factor de seguridad de la pieza es FS = 87.9.

4.4.2.4 Influencia del escalado en las propiedades mecánicas

Como con el modelo anterior, se presentan los resultados resumidos más importantes extraídos de las simulaciones en la Tabla XXIV. Como se comentó en el análisis de la boquilla B, en la tabla se muestran los valores determinados para el límite elástico ($\sigma_{p0.2}$) y resistencia del material seleccionado (σ_m), las tensiones de VM generadas por la presión de 2.5 MPa ejercida por el conjunto de fluidos (σ_{VM}), el desplazamiento generado por esta tensión ($D_{m\acute{a}x}$) y el factor de seguridad de diseño (FS), siendo este último parámetro clave para validar los materiales seleccionados para las boquillas.

Como en el caso anterior, una comparativa directa entre las piezas a las diferentes escalas o incluso una comparación entre boquillas es muy complicada por ser piezas diferentes y presentar un escalado no proporcional en función del diseño. Aun así, se va a intentar agrupar, como en el caso anterior, las piezas en base a sus características generales y evolución de las tensiones de VM generadas con el escalado.

En el caso de las piezas internas de la boquilla (swirl_insert, swirl_modif, mixing_chamber 1, inlet_nozzle, mixing_chamber 2, outlet_nozzle e inlet_particles) las tensiones de VM apenas varían con el escalado de las mismas y son lo suficientemente robustas como para soportar las tensiones generadas.

Por otro lado, en la carcasa exterior inferior (lower_cylinder_housing) se observa que al reducir las dimensiones de escala 1:1 a escala 1:2 las tensiones aumentan, sin

embargo, en la boquilla a escala 1:3 disminuyen. Esto es debido a que de la escala 1:1 a la escala 1:2 la reducción fue proporcional, en cambio, de escala 1:2 a escala 1:3, se redujo el tamaño de la pieza pero no así su espesor. Con ello se favoreció la solidez de la pieza.

Y por último, como en el caso de la boquilla B, se ha detectado la existencia de piezas que una reducción de su tamaño, conlleva una reducción de las tensiones que se generan en las mismas, por ejemplo en el `inlet_nozzle`, `adapter_swirl`, `input_air` y `top_flage`.

Esta última pieza, `top_flage`, requiere un mayor análisis. A escala 1:1, en AA 6061 – T6 y con las condiciones adversas supuestas, las tensiones de VM generadas superan al límite elástico del material e incluso la resistencia máxima. Estas simulaciones son más exigentes que las realizadas en la selección de materiales, ya que se supone una presión interna de agua en toda la pieza y no solo en la zona central. Se conjetura que el agua revierte y que las juntas de estanqueidad se ven superadas por la presión. Por otro lado, esta pieza comparada con el `top_flage` de la boquilla B únicamente difiere en la profundidad de los taladros centrales, y su comportamiento a escala 1:1 y a escala 1:3 guarda relación al presentar los mismos espesores. Sin embargo, en la escala 1:2, el comportamiento de ambas difiere en gran medida. En el `top_flage` B 1:2 las tensiones de VM son del orden de 190 MPa, mientras que en el de la boquilla F 1:2 son del orden de 420 MPa. Esta es la única pieza que difiere de esta forma entre los modelos y es debido al espesor de la misma. La reducción de diámetro se realizó proporcionalmente de unas escalas a otras en ambos modelos, pero no así su espesor. El `top_flage` de la pieza B presenta un espesor de 7 mm, mientras que en de la boquilla F es de 5 mm. Esto hace que las tensiones de VM generadas aumenten, reduciéndose a su vez el FS y aumentándose el desplazamiento. Los espesores son un parámetro clave en la concentración de tensiones de VM.

En lo que respecta al FS, van a compararse las boquillas escaladas, ya que los FS de las piezas de la boquilla a escala 1:1 están calculados tomando como referencia el límite elástico del AA 6061 – T6, siendo este mucho menor que el del AA 7075 – T6. En esta comparativa se observa cómo, en general, en las piezas cilíndricas interiores el FS es próximo entre ambas escalas e incluso más elevado en las boquillas escaladas a 1:2.

Pero centrándonos en las piezas críticas como son `inlet_water`, `top_flage` y `lower_cylinder_housing`, es más favorable un diseño escalado, si bien el espesor de estas piezas no se ha escalado igualmente de 1:2 a 1:3, y por ello a ésta última escala los resultados son más favorables.

Como se ha comentado anteriormente, la pieza más sensible también para este modelo es en concreto el `top_flage`. Al suponerse que el agua pueda revertir su sentido y ejercer una presión sobre toda la superficie de la tapa, convertimos a esta tapa en una pieza crítica dado su espesor y su número de taladros. A escala 1:1 con la AA 6061 – T6 esta pieza podría sufrir daños graves si trabajara en condiciones adversas, a máxima presión y con la boquilla taponada. En un funcionamiento normal de la boquilla ésta no sufriría esas cargas. Aun así, con el empleo del AA 7075 – T6 garantiza la

integridad del sistema ya que en ninguna de las escalas se superaría el límite elástico de la aleación. Además, esta aleación favorece el empleo de las boquillas a T de emergencia.

Tabla XXIV. Comparativa de los resultados obtenidos en las simulaciones de la boquilla F.

Escala	Pieza	$\sigma_{p0.2}$ / MPa	σ_m / MPa	σ_{vm} / MPa	$D_{m\acute{a}x}$ / mm	FS
Escala 1:1 en AA 6061 - T6	Inlet_water	275	310	56	$1.4 \cdot 10^{-2}$	4.9
	Top_Flage			444	1.4	0.6
	Swirl_insert			15	$2.3 \cdot 10^{-3}$	17.9
	Adapter_swirl			46	$1.0 \cdot 10^{-3}$	5.9
	Swirl_modif			19	$1.8 \cdot 10^{-3}$	14.6
	Mixing_chamber 1			6.9	$1.6 \cdot 10^{-3}$	39.6
	Inlet_nozzle			19	$1.9 \cdot 10^{-3}$	14.5
	Mixing_chamber 2			8.7	$2.2 \cdot 10^{-3}$	31.7
	Outlet_nozzle			5.4	$1.1 \cdot 10^{-3}$	50.5
	Lower_cylinder_Housing			68	$3.1 \cdot 10^{-2}$	4.0
	Input_air			5.3	$7.3 \cdot 10^{-4}$	51.6
	Inlet_particles			4.6	$1.1 \cdot 10^{-4}$	59.6
Escala 1:2 en AA 7075 - T6	Inlet_water	505	570	37	$5.5 \cdot 10^{-3}$	13.6
	Top_Flage			420	0.6	1.8
	Swirl_insert			16	$3.3 \cdot 10^{-3}$	31.2
	Adapter_swirl			39	$5.5 \cdot 10^{-4}$	12.9
	Swirl_modif			19	$9.2 \cdot 10^{-4}$	25.9
	Mixing_chamber 1			7.1	$7.6 \cdot 10^{-4}$	71.4
	Inlet_nozzle			14	$8.5 \cdot 10^{-4}$	36.7
	Mixing_chamber2			9.8	$1.3 \cdot 10^{-3}$	51.3
	Outlet_nozzle			5.9	$5.5 \cdot 10^{-4}$	85.6
	Lower_cylinder_Housing			76	$1.3 \cdot 10^{-2}$	6.6
	Input_air			15	$6.8 \cdot 10^{-4}$	34.2
	Inlet_particles			4.8	$6.6 \cdot 10^{-5}$	104
Escala 1:3 en AA 7075 - T6	Inlet_water	505	570	26	$2.4 \cdot 10^{-3}$	19.6
	Top_Flage			93	$4.7 \cdot 10^{-2}$	5.4
	Swirl_insert			17	$1.3 \cdot 10^{-3}$	29.8
	Adapter_swirl			20	$1.3 \cdot 10^{-3}$	25.6
	Swirl_modif			22	$6.7 \cdot 10^{-4}$	22.7
	Mixing_chamber 1			7.7	$7.0 \cdot 10^{-4}$	65.4
	Inlet_nozzle			16	$8.6 \cdot 10^{-4}$	31.2
	Mixing_chamber2			18	$1.6 \cdot 10^{-3}$	43.0
	Outlet_nozzle			5.5	$3.6 \cdot 10^{-4}$	91.2
	Lower_cylinder_Housing			58	$7.1 \cdot 10^{-3}$	8.7
	Input_air			14	$5.7 \cdot 10^{-4}$	36.9
	Inlet_particles			5.7	$8.0 \cdot 10^{-5}$	87.9

Por regla general, se favorece la integridad del diseño con aumentos de espesores de las piezas sensibles o simplemente con la utilización de un aluminio con mejores propiedades mecánicas como es la AA 7075 – T6. Esta aleación permite una utilización de la boquilla en condiciones seguras y además, favorece la integridad del sistema de boquillas incluso a T de emergencia.

En este documento no se incluyen los resultados obtenidos de la modelación realizada para la escala 1:1 de la AA 7075 – T6, al no ser de aplicación en el resto de resultados experimentales que son de interés en esta memoria de investigación.

4.4.3 Conjunto B 1:2 en servicio

En base a distintas pruebas preliminares realizadas por la UAH [96] y a los primeros ensayos realizados por el CIEMAT (que se describirán en el punto 4.8), se determinó que el modelo y escala ideal para la generación de una niebla adecuada era la boquilla B 1:2. Por esta razón, se realizó un estudio más en detalle de sólo esta boquilla con el programa ANSYS [92]. Este código permite la modelación del trabajo y los esfuerzos a los que se van a ser sometidas las piezas de la boquilla y permiten determinar las tensiones máximas generadas en un funcionamiento normal de la boquilla, a diferencia de lo obtenido con las modelaciones antes presentadas. También en este apartado se presentarán los resultados obtenidos de la modelación del comportamiento durante la vida útil de la boquilla.

La base de datos de este programa es muy básica por lo que no se pueden encontrar todos los materiales. Las simulaciones se han realizado con un Al genérico con las propiedades mostradas en la Tabla XXV. Presenta propiedades próximas a la AA 6061 - T6 del programa SolidWorks y a la AA 6082 – T6 testada.

Tabla XXV. Propiedades básicas del aluminio utilizado para las simulaciones con ANSYS [92].

Límite elástico	280 MPa
Límite tracción	310 MPa

La utilización como material base de la AA 7075 – T6, con mejores propiedades mecánicas, mejorará los resultados y reforzará la integridad de las boquillas aumentando la vida útil de las mismas.

4.4.3.1 Análisis estático de resistencia

La modelación se realizó considerando una malla media de transición suave a una temperatura de 22 °C con una carga de 2.5 MPa, fijando la boquilla en la zona de la tornillería. En este estudio se realizó un análisis de sensibilidad, al objeto de comprobar cómo influye en el resultado final el tipo de contacto que se considere existente entre piezas. Fundamentalmente, este estudio se realizó donde no existen o – ring, como son entre la pieza que aporta el agua (input_water) y el swirl_insert y la pieza encajada de salida (nozzle_insert) con su contigua.

4.4.3.1.1 Análisis estructural suponiendo un único sólido

La modelación considerando este tipo de contacto supone que entre las piezas existe una total adhesión y que se comportan como un sólido rígido. En este caso, la máxima tensión de VM generada se detecta en la pieza de salida. Este valor de tensión es de 45 MPa, muy por debajo de las características mecánicas del material seleccionado.

Los resultados obtenidos permiten confirmar que el diseño es seguro. Además, permiten también proponer mejoras de diseño como curvar los ángulos de esa pieza para evitar esta acumulación de tensiones. En la Figura 189 y en la Figura 190 se muestra un esquema de los resultados obtenidos del análisis estático estructural, donde se puede observar la deformación de las piezas sobredimensionada ($6.3 \cdot 10^2$, en el caso de este estudio para poder apreciar la deformación que se produce).

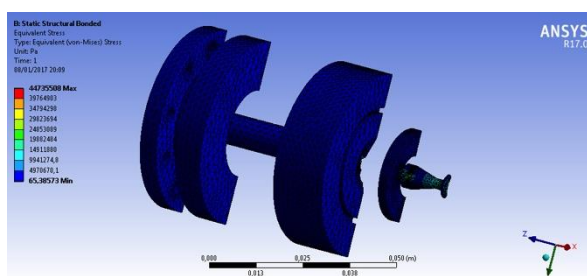


Figura 189. Tensiones generadas en la boquilla B 1:2 en funcionamiento normal a 2.5 MPa, suponiendo un contacto sólido de las piezas.

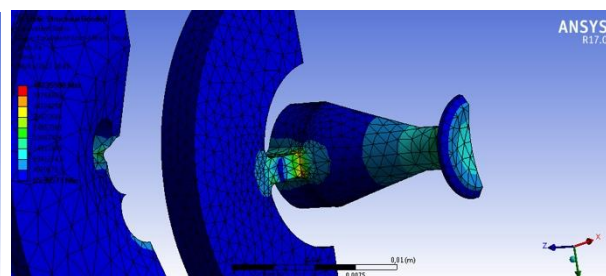


Figura 190. Detalle de la zona donde se produce una mayor acumulación de tensiones.

4.4.3.1.2 Análisis estructural sin fricción

Este tipo de análisis supone un movimiento libre de las tres piezas seleccionadas (input_water, swirl_insert y nozzle_insert). En este tipo de contacto, la tensión máxima generada es de 49 MPa y nuevamente se produce en la pieza pequeña de salida (Figura 191 y Figura 192).

Los resultados obtenidos para este modelo indican que el material empleado asegura la integridad del diseño al no superarse el límite elástico del mismo. En este supuesto, se muestra una deformación de la pieza aumentada un $5.8 \cdot 10^2$.

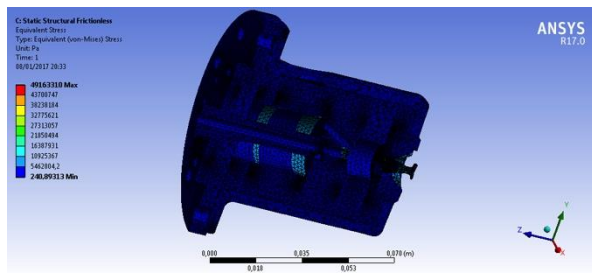


Figura 191. Tensiones generadas en la boquilla B 1:2 en funcionamiento normal a 2.5 MPa, suponiendo un movimiento libre de las piezas seleccionadas.

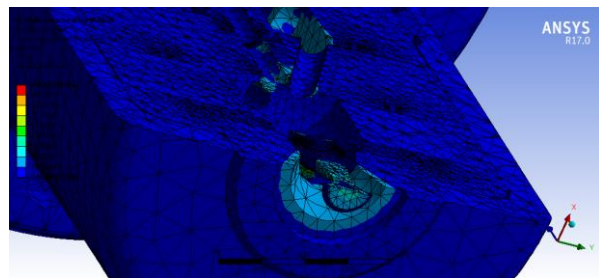


Figura 192. Detalle de la zona donde se produce una mayor acumulación de tensiones.

4.4.3.1.3 Análisis estructural con fricción pero sin desplazamiento de las piezas

En este tipo de análisis se parte de la hipótesis de que existe fricción en las caras de los contactos de las piezas pero sin desplazamiento de las mismas. La tensión máxima generada es de nuevo 45 MPa y como en los casos anteriores se produce en la pieza pequeña de salida (nozzle_insert) (Figura 193 y Figura 194).

Este modelo asegura que si bien las tensiones se transmiten entre las distintas piezas de la boquilla, sin movimiento de las mismas, la fabricación de la boquilla en AA 7075 - T6 garantiza la integridad del diseño al no superarse el límite elástico del mismo. Ni siquiera es superado el límite elástico de una AA sencilla como es la AA 6061 - T6. En este caso, para el análisis de sensibilidad de la deformación se ha representado un sobredimensionamiento de la deformación en las piezas producida de $5.3 \cdot 10^2$.

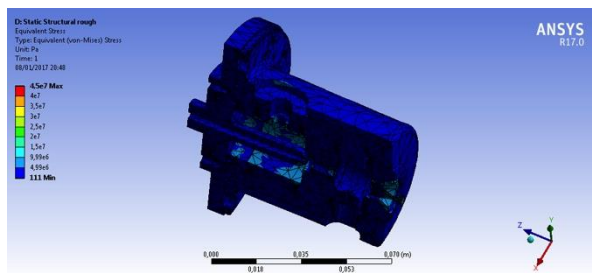


Figura 193. Tensiones generadas en la boquilla B 1:2 en funcionamiento normal a 2.5 MPa, suponiendo fricción pero sin desplazamiento de las piezas seleccionadas.

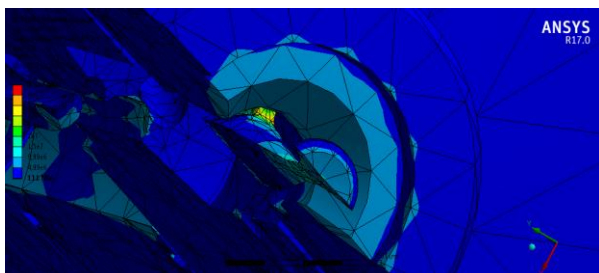


Figura 194. Detalle de la zona donde se produce una mayor acumulación de tensiones.

4.4.3.1.4 Análisis estructural con fricción

Por último, se realizó un análisis estructural suponiendo fricción entre las piezas comentadas con anterioridad. En concreto se seleccionó un coeficiente de fricción de 1.05. Este sería el caso más conservativo y el menos realista, en el que se tienen en cuenta posibles esfuerzos que pudieran transmitirse de unas piezas a otras a través del contacto entre las superficies y prevé posibles desplazamientos de las piezas. Con esta

opción de contacto entre piezas, la tensión máxima generada es de 48 MPa y como en los casos anteriores se produce en la pieza pequeña de salida (nozzle_insert) (Figura 195 y Figura 196).

Los resultados obtenidos de la modelación son igualmente positivos y demuestran que las boquillas fabricadas en AA 7075-T6 son seguras desde el punto de vista de la integridad del diseño al no superarse el límite elástico del mismo.

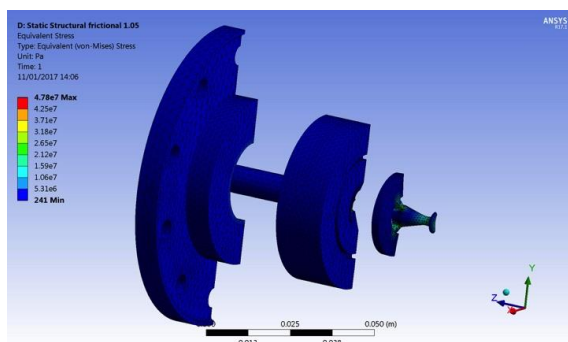


Figura 195. Tensiones generadas en la boquilla B 1:2 en funcionamiento normal a 2.5 MPa, suponiendo fricción entre piezas.

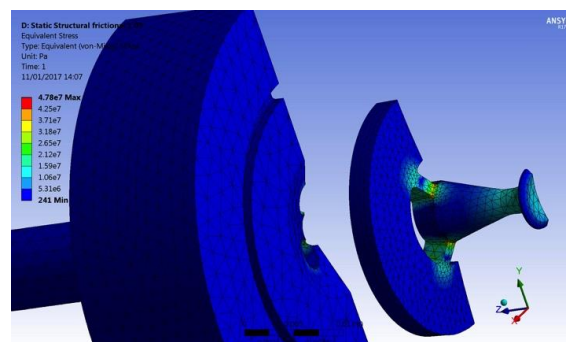


Figura 196. Detalle de la zona donde se produce una mayor acumulación de tensiones.

4.4.3.2 Análisis de fatiga

La modelación y análisis del comportamiento a fatiga de la boquilla B 1:2 se realizó en las mismas condiciones anteriormente expuestas a una temperatura de 22 °C y una presión interna de 2.5 MPa. Se realizaron con el mismo análisis de sensibilidad que en el apartado anterior, es decir tipo de rozamiento entre la pieza que aporta el agua (input_water) y el swirl_insert y la pieza encajada de salida (nozzle_insert) con su contigua. En base a los manuales del programa ANSYS [92], para realizar un estudio viable se ha supuesto un factor de concentración de esfuerzos por fatiga k_f (vida infinita) de 0.4.

4.4.3.2.1 Análisis de fatiga suponiendo un único sólido

Para este tipo de contacto resulta que el tiempo mínimo de vida en la zona en la que se produce un mayor daño es de $1.7 \cdot 10^7$ h (Figura 197), alrededor de 2000 años. Trascurrido este tiempo el mínimo factor de seguridad detectado es de 0.9 (Figura 198 y Figura 199) en la pieza de salida de la niebla debido a su diseño y finos espesores.

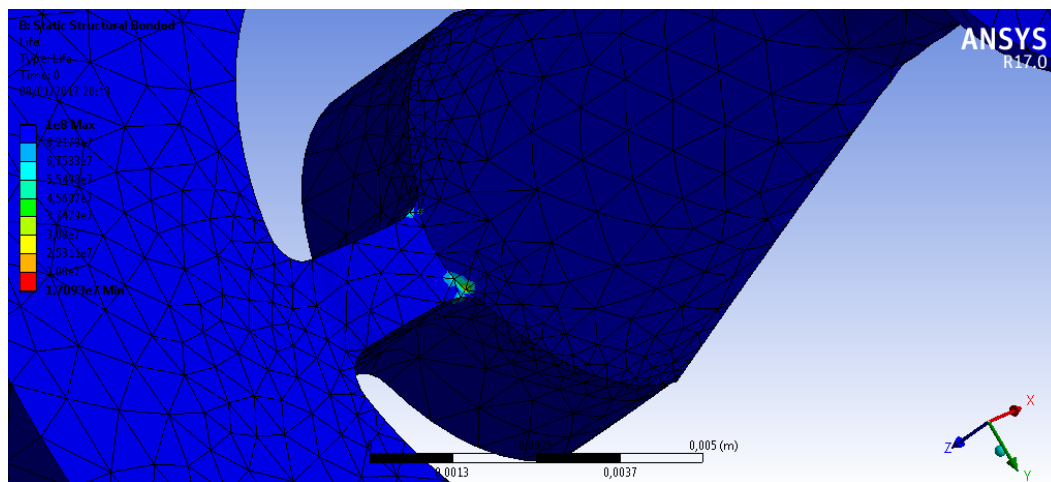


Figura 197. Horas de vida útil de la boquilla B 1:2 sometida a una presión de 2.5 MPa con contacto sólido entre piezas. Mínimo de $1.709 \cdot 10^7$ h aproximadamente 2000 años.

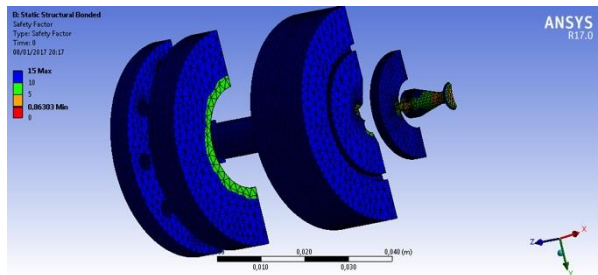


Figura 198. Factor de seguridad al término de la vida útil de la boquilla.

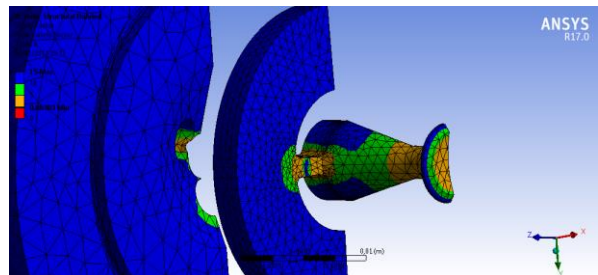


Figura 199. Detalle de la pieza de menor FS al término de su vida útil. FS = 0.9.

4.4.3.2.2 Análisis de fatiga sin fricción

En este otro tipo de contacto, libre de fricción y con deslizamientos libres de las piezas, el tiempo mínimo de vida en la zona en la que se produce una mayor concentración de tensiones es de $8 \cdot 10^6$ h (Figura 204 y Figura 205), es decir, por encima de los 9 años. Trascurrido este tiempo el mínimo factor de seguridad detectado en la pieza de salida de la niebla es de 0.4 (Figura 206 y Figura 207), debido a su diseño y finos espesores.

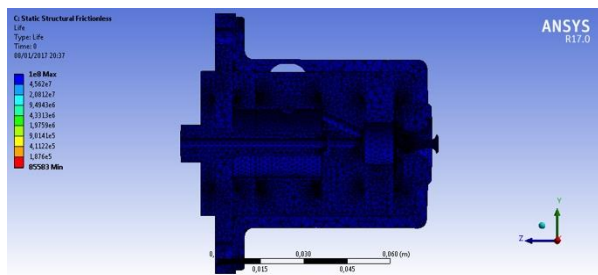


Figura 200. Horas de vida útil de la boquilla B 1:2 sometida a una presión de 2.5 MPa libre de fricciones. Mínimo de 9 años.

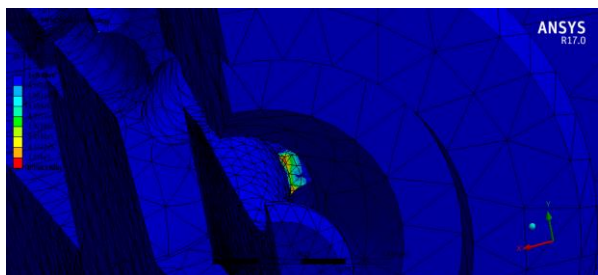


Figura 201. Detalle de la pieza que presenta una menor vida útil.

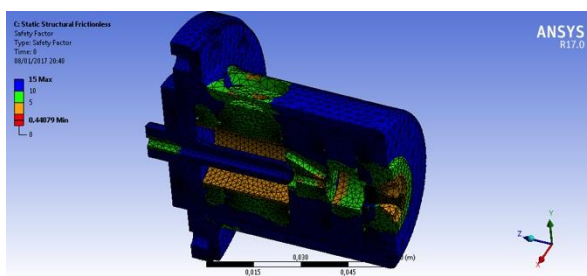


Figura 202. Factor de seguridad al término de la vida útil de la boquilla.

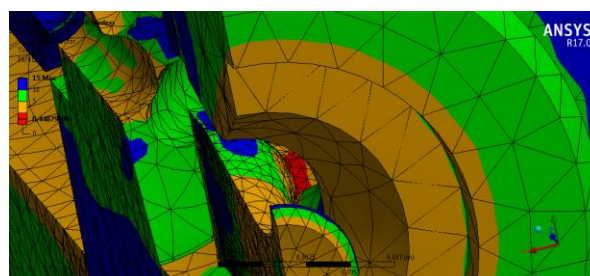


Figura 203. Detalle de la pieza de menor FS. 0.4 al término de su vida útil.

4.4.3.2.3 Análisis de fatiga con fricción pero sin desplazamiento de las piezas

Como en el caso del análisis de tensiones, se ha propuesto un contacto con fricción pero sin desplazamiento. El tiempo mínimo de vida útil en la zona en la que se produce un mayor daño en este tipo de contacto propuesto es de $1.7 \cdot 10^5$ h (Figura 204 y Figura 205), es decir por encima de los 19 años. Trascurrido este tiempo el mínimo factor de seguridad detectado es de 0.5 (Figura 206 y Figura 207) de nuevo en la pieza de salida de la niebla debido a su diseño y finos espesores.

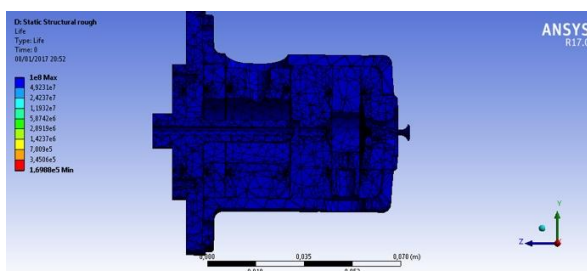


Figura 204. Horas de vida útil de la boquilla B 1:2 sometida a 2.5 MPa con fricción pero sin desplazamiento. Mínimo de 19 años.



Figura 205. Detalle de la pieza que presenta una menor vida útil.

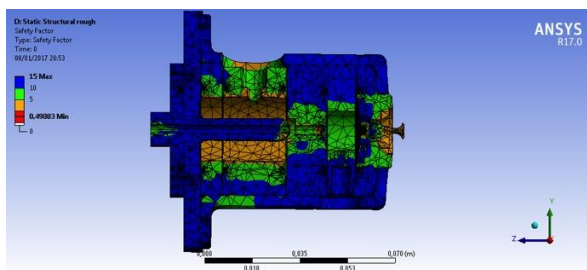


Figura 206. Factor de seguridad al término de la vida útil de la boquilla.

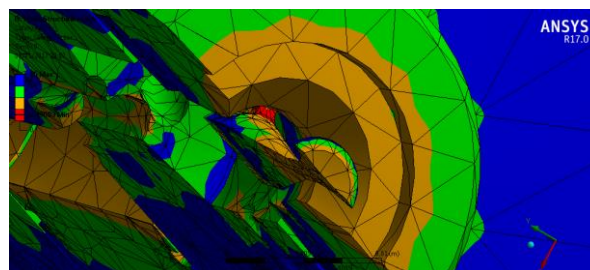


Figura 207. Detalle de la pieza de menor FS, siendo este de 0.5 al término de su vida útil.

4.4.3.2.4 Análisis de fatiga con fricción

Y por último, se estudió la vida útil de la boquilla sometida a un contacto con fricción. En este caso, el tiempo mínimo de vida útil es de 10^5 h (Figura 208). Tras estos casi 12 años, el factor de seguridad en la pieza que soportaría una mayor tensión y estaría más dañada es de 0.5 (Figura 209 y Figura 210).

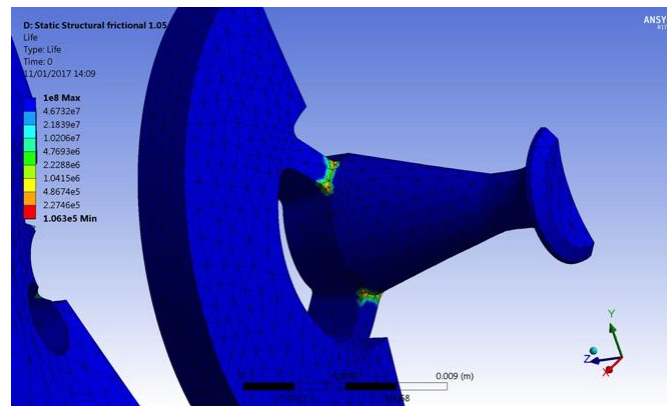


Figura 208. Detalle de la pieza que presenta una menor vida útil. El mínimo de horas de vida útil de esta boquilla B 1:2 sometida a ciclos de presión de 2.5 MPa es de más de 12 años.

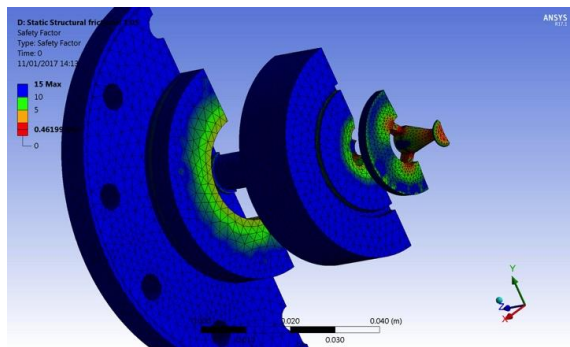


Figura 209. Factor de seguridad al término de la vida útil de la boquilla.

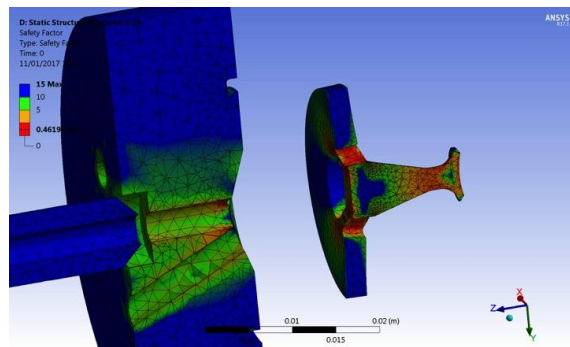


Figura 210. Detalle de la pieza de menor FS, 0.5 al término de su vida útil.

4.4.3.3 Discusión de resultados

De los resultados obtenidos en la modelación y presentados en los apartados anteriores, cuando se tiene en cuenta el análisis estructural, las tensiones máximas generadas no distan en gran medida de unos contactos a otros, pero sin embargo, la vida útil de la boquilla si se ve influenciada.

Del análisis de sensibilidad realizado se deduce que el contacto que genera una mayor tensión de VM es el de sin fricción con libre deslizamiento de las piezas. Aun así, la vida útil de la boquilla resultante alcanza un valor superior a los 9 años, con un FS de la zona más sensible de la pieza más débil de 0.4 al término de la vida útil. Si se deseara, estos resultados podrían mejorarse suavizando las curvas de esta pieza, aumentando sus espesores o bien con la selección de la AA 7075 – T6. Los resultados obtenidos de las sucesivas simulaciones confirman que la aleación de Al seleccionada garantiza la integridad del sistema de boquillas en funcionamiento.

Cabe destacar cómo en un funcionamiento normal de la boquilla, la pieza donde se concentran las tensiones debido al diseño y a las presiones de trabajo es la que está a la salida de la boquilla (Figura 211), y cómo suponiendo un comportamiento anormal del sistema, taponándose la boquilla y revertiendo la dirección de los fluidos en la

boquilla, la pieza donde se acumulan las tensiones y que presenta un menor FS es otra diferente, la parte superior de la carcasa (Figura 212).

Es importante señalar que estas simulaciones son ideales, es decir no se tiene en cuenta la abrasión que puede sufrir el material y/o la corrosión. Siendo así, sería apropiado realizar un ensayo a fatiga a escala real, que permitiría comparar los resultados del modelo teórico con los experimentales.

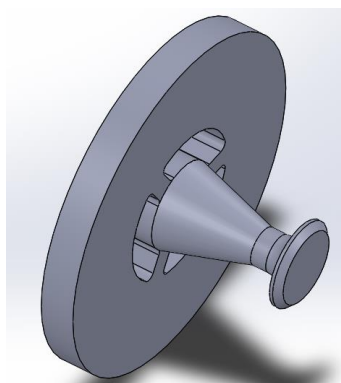


Figura 211. Nozzle_insert, pieza más débil en un funcionamiento normal de la boquilla.

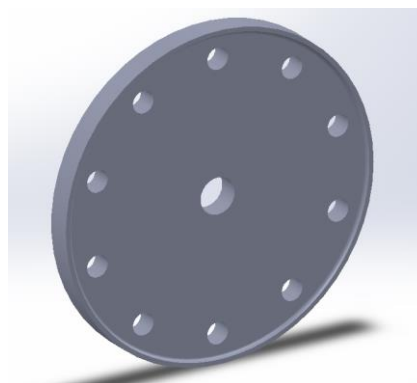


Figura 212. Top_flage, pieza más débil en un comportamiento anormal de la boquilla.

4.5 Caracterización de los agentes simuladores NR

En los puntos siguientes del presente capítulo de la memoria de investigación, se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de los simuladores NR. Esta caracterización del tamaño de partícula se representó en forma de histograma, con su línea de frecuencia característica y, además, se muestran los resultados de los diferentes diámetros calculados para el 90 %, 50 % y 10 % de las partículas ($D[v,0.9]$, $D[v,0.5]$ y $D[v,0.1]$).

Es importante resaltar que el $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ no se trató antes de los análisis ni de los experimentos. Sin embargo, el resto de los compuestos seleccionados se secaron y molieron durante 3 min a 350 rpm con el molino de bolas de la marca Restch modelo S100. Esto fue debido a que su tamaño inicial de partícula era elevado y caía por sí mismo en un plazo corto de tiempo, no pudiéndose generar una nube de material pulverulento con un TOF adecuado para la medición y comparación.

Los datos y resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de las partículas de polvo de los diferentes simuladores seleccionados se muestran a continuación. En el punto 4.5.7, se realiza un estudio comparativo entre los tamaños de los diferentes compuestos seleccionados. Es importante mencionar y recordar que los resultados experimentales que se presentan son un caso representativo (o en su caso promedio) y reproducible de al menos un número de ensayos impares y superior a 5.

4.5.1 Talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)

El $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ seleccionado para la realización de los ensayos fue suministrado por Johnson's and Johnson's. En la Figura 213, se muestra una macrografía del polvo de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ utilizado. Su tamaño de partícula inicial fue lo suficientemente pequeño como para no tener que procesarlo antes de su empleo.

En la Figura 215, se muestra la distribución de partícula obtenida. Se representa el histograma de tamaño de partícula junto a la línea de frecuencia de los datos obtenidos. Por lo general, la distribución del tamaño de partícula se define mediante los parámetros $D[v, 0.9]$, $D[v, 0.5]$ y $D[v, 0.1]$, mostrados también en la Figura 215. Se repitió cinco veces la medida para garantizar la repetitividad de los resultados y en todos se obtenían los mismos diámetros, por lo que los ensayos muestran una gran repetitividad, y además, la pirámide del histograma presenta una base relativamente estrecha por lo que la muestra es homogénea. El $D_{0.9}$ del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ es de $11.91 \mu\text{m}$.

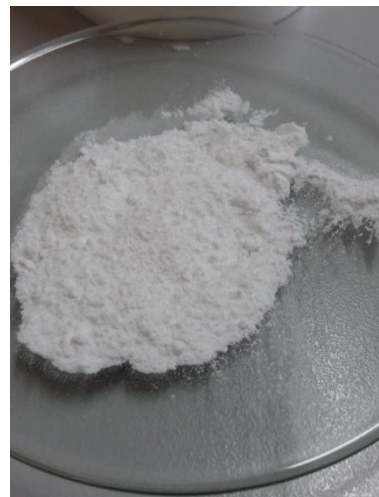
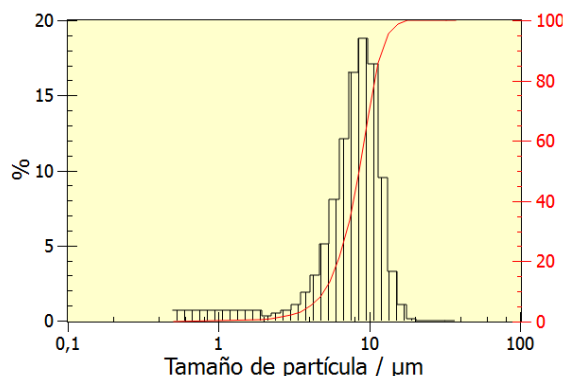


Figura 213. $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ en estado bruto.



$$D[v, 0.9] = 11.91 \mu\text{m}$$

$$D[v, 0.5] = 8.46 \mu\text{m}$$

$$D[v, 0.1] = 4.97 \mu\text{m}$$

Figura 214. Distribución del tamaño de partícula del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ y valores de diámetro en base al porcentaje de partículas medido.

4.5.2 Bicarbonato sódico (NaHCO_3)

En cuanto al NaHCO_3 , se muestra una macrografía de NaHCO_3 antes (Figura 215) y después de ser molido (Figura 216) a 350 rpm durante 3 min para favorecer su dispersión y permanencia en la atmósfera del COUNTERFOG – Lab. Los resultados obtenidos de la distribución de partículas del NaHCO_3 , así como su diámetro en base a la población de partículas, se muestran en la Figura 217. En este caso el $D_{0.9}$ del NaHCO_3 es de $34.89 \mu\text{m}$, superior al tamaño de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ medido. Asimismo, el NaHCO_3 presenta una ligera desviación entre los diámetros medidos en los diferentes ensayos, su repetitividad es menor, y a su vez, la dispersión de los datos mostrados en los histogramas obtenidos es mayor que en el caso del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Esto quiere

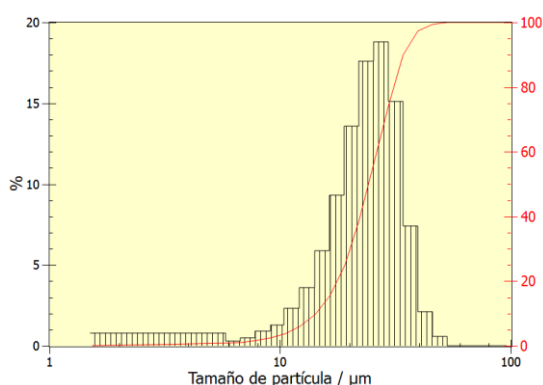
decir que la muestra presenta una menor homogeneidad que la anteriormente estudiada.



Figura 215. Estado inicial del NaHCO_3 proporcionado por Sigma-Aldrich.



Figura 216. Apariencia del NaHCO_3 una vez molida la muestra.



$$D [v, 0.9] = 34.89 \mu\text{m}$$

$$D [v, 0.5] = 24.76 \mu\text{m}$$

$$D [v, 0.1] = 14.54 \mu\text{m}$$

Figura 217. Distribución de tamaño de partícula de NaHCO_3 y diámetros característicos.

4.5.3 Cloruro sódico (NaCl)

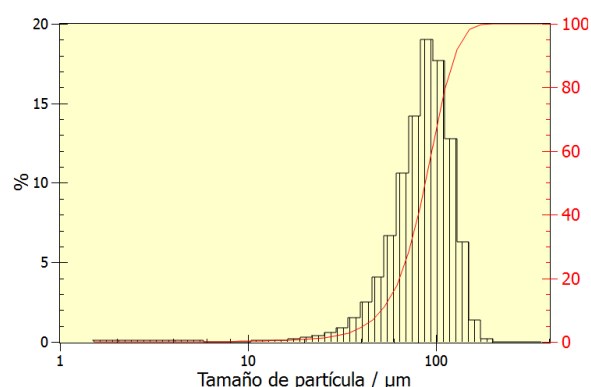
La sal común original (Figura 218) y molida (Figura 219) se observan en las figuras que se muestran a continuación. En los análisis de distribución de tamaño de partícula puede verse que, aun moliendo la muestra, los tamaños medidos de este compuesto están por encima de los anteriores, siendo su $D_{0.9}$ de $125 \mu\text{m}$ (Figura 220). Como en el caso del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, en todos los ensayos se obtienen los mismos diámetros de los histogramas con un alto grado de repetitividad, pero, sin embargo, los diámetros obtenidos muestran una mayor dispersión. El NaCl presenta una gran estabilidad en el dispersante utilizado, pero una menor homogeneidad que en los casos anteriores.



Figura 218. Aspecto del NaCl antes del proceso de molienda.



Figura 219. Muestra procesada de NaCl .



$$D [v, 0.9] = 125.28 \mu\text{m}$$

$$D [v, 0.5] = 87.80 \mu\text{m}$$

$$D [v, 0.1] = 51.50 \mu\text{m}$$

Figura 220. Distribución de tamaño de partículas del compuesto NaCl y sus diámetros característicos.

4.5.4 Cloruro de Cesio (CsCl)

El CsCl, proporcionado por Sigma-Aldrich, se muestra en la Figura 221. Como en los casos anteriores fue necesaria una molienda del material de partida para facilitar la suspensión del mismo en el ambiente (aspecto mostrado en la Figura 222). Para este compuesto, puede observarse en base a su histograma (ver Figura 223) que el tamaño medio de partícula es ligeramente superior a los anteriormente mostrados. Su $D_{0.9}$ es de 170 μm . Las medidas realizadas son repetitivas, mostrándose una gran estabilidad de las partículas en el solvente utilizado, pero como en el caso del NaCl la dispersión entre los diferentes diámetros obtenidos es mayor, presentando la mayor diferencia entre $D_{0.1}$ y $D_{0.9}$.

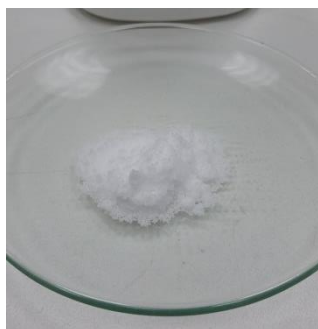
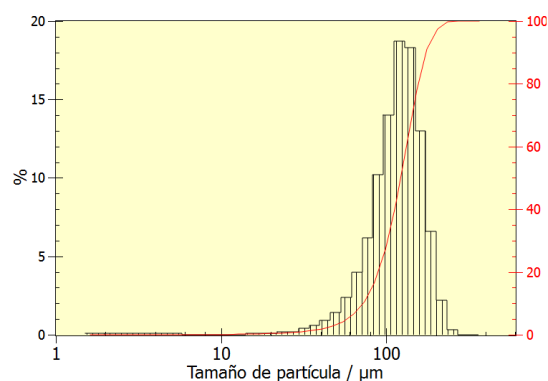


Figura 221. Estado inicial del CsCl.



Figura 222. Aspecto del CsCl tras la molienda.



$$D [v, 0.9] = 170.29 \mu\text{m}$$

$$D [v, 0.5] = 119.71 \mu\text{m}$$

$$D [v, 0.1] = 70.27 \mu\text{m}$$

Figura 223. Histograma de la distribución de partículas y línea de frecuencias del compuesto CsCl, así como sus diámetros característicos de la muestra de CsCl medida.

4.5.5 Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)

El $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ha sido también proporcionado por el fabricante Sigma-Aldrich (ver Figura 224). Siguiendo el proceso establecido en los casos anteriores, se procedió a la molienda del producto de partida durante 3 min a 350 rpm, para favorecer la suspensión del mismo durante los ensayos (Figura 225). La diferencia de aspecto y volumen del producto antes y después de la molienda puede observarse claramente en las Figura 224 y Figura 225.

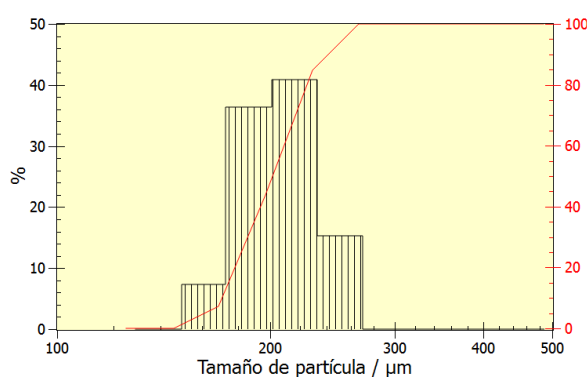


Figura 224. Estado inicial del simulador $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$.



Figura 225. Muestra de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ tras el proceso de molienda pertinente.

En el caso del $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, la muestra se concentra en cuatro intervalos de tamaño de partícula; [150 – 173] un 7.3 % de la muestra, entre [173 – 201] un 36.4 % de la muestra, entre [201 – 233] un 40.9 % y entre [233 – 270] un 15.3 %. En la Figura 226, se muestra el histograma de la distribución de tamaño de partículas, así como los resultados de diámetros característicos en base al porcentaje de partículas medido. De todos los presentados hasta ahora, el $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ es el de mayor tamaño, $D_{0.9}$ de 272 μm . En este caso, este compuesto presenta una homogeneidad del orden de la detectada en el NaCl.



$$D[v, 0.9] = 242.09 \mu\text{m}$$

$$D[v, 0.5] = 204.27 \mu\text{m}$$

$$D[v, 0.1] = 176.66 \mu\text{m}$$

Figura 226 Distribución de partículas de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y diámetros característicos extraídos del mismo.

4.5.6 Fosfato potásico (KH_2PO_4)

El KH_2PO_4 , también fue proporcionado por Sigma-Aldrich (ver Figura 227), y al igual que el NaHCO_3 y la $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, el aspecto visual del compuesto varía en gran medida tras el proceso de molienda (ver Figura 228). El tamaño de partícula de este compuesto está próximo al de NaHCO_3 , y su histograma de distribución de partícula, así

como sus diámetros medidos, pueden observarse detalladamente en la Figura 229. Estos diámetros de unos ensayos a otros varían ligeramente y su histograma muestra una dispersión similar a la del NaHCO_3 , ambos presentan características y solubilidades próximas.



Figura 227. Estado inicial del KH_2PO_4 .



Figura 228. Aspecto del KH_2PO_4 una vez molido.

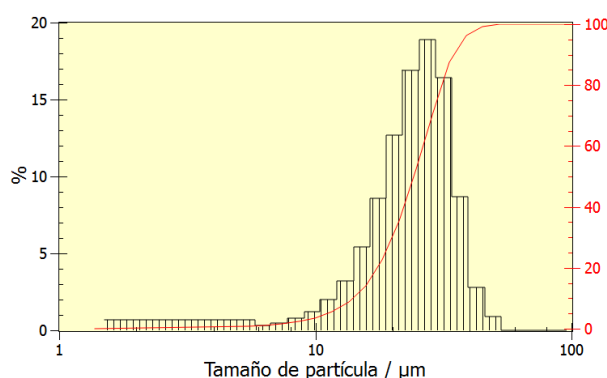


Figura 229. Distribución del tamaño de partícula del KH_2PO_4 y valores de diámetros asociados.

$$D [v, 0.9] = 35.13 \mu\text{m}$$

$$D [v, 0.5] = 24.93 \mu\text{m}$$

$$D [v, 0.1] = 14.64 \mu\text{m}$$

4.5.7 Comparativa de los tamaños de partículas de los NR utilizados

A continuación, se muestra un resumen de los tamaños medios de partícula obtenidos para cada uno de los compuestos (Tabla XXVI y Figura 230). En base a estos datos podemos determinar que el compuesto de menor tamaño es el más apolar, el $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, mientras que los de mayor tamaño son el $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y los cloruros, que coinciden con los elementos de mayor solubilidad. Con tamaños intermedios se encuentran el NaHCO_3 y el KH_2PO_4 , sus solubilidades son a su vez intermedias.

La dispersión entre los diferentes diámetros medidos ($D [v,0.9]$, $D [v,0.5]$ y $D [v,0.1]$) puede evaluarse en el diagrama de cajas y bigotes mostrado en la Figura 231. En esta gráfica se puede observar que el $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, el NaHCO_3 y el KH_2PO_4 son los que presentan una menor diferencia entre ellos, mientras que en los cloruros y el $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ esta dispersión es mayor.

En concreto la caja del CsCl es la de mayor tamaño, y por ello, el compuesto de menor homogeneidad. En casi todos los compuestos medidos, excepto en el $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, la media coincide con la mediana y los cuartiles son simétricos. En el $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ no, los datos están concentrados en el segundo cuartil 50 – 75 %, y es el que presenta un

valor máximo y mínimo más alejado de la media. Por todo ello, se puede afirmar que este compuesto presenta una elevada dispersión de tamaños.

Tabla XXVI. Diámetros medios de cada simulador seleccionado obtenidos de los histogramas mostrados.

NR	$D_m [v,0.9] / \mu m$	$D_m [v,0.5] / \mu m$	$D_m [v,0.1] / \mu m$
$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	11.91	8.46	4.97
$NaHCO_3$	34.89	24.76	14.54
$NaCl$	125.28	87.80	51.50
$CsCl$	170.29	119.71	70.27
$CO(NH_2)_2$	242.09	204.27	176.66
KH_2PO_4	35.13	24.93	14.54

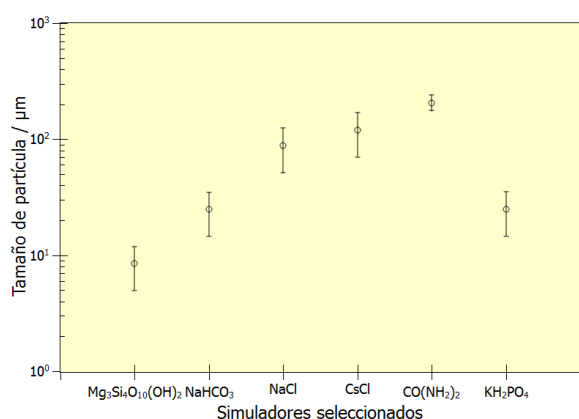


Figura 230. Representación del diámetro al 50 % de los NR seleccionados y de su consecuente error al 10 % y 90 %.

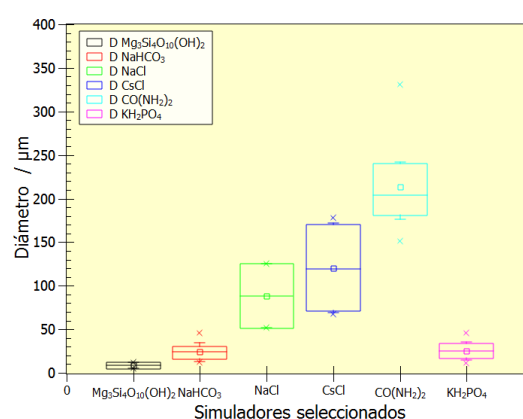


Figura 231. Diagrama de cajas y bigotes de los simuladores seleccionados. Las cajas muestran los cuartiles de 25 – 50 % y 50 – 75 %. Con los bigotes se han representado los valores de 10 – 90 %, así como los valores atípicos máximos y mínimos.

4.6 Detección de la pluma de contaminante

Gracias a las diferentes técnicas ópticas de detección on-line comentadas en el punto 3.7.5.1 del procedimiento experimental, se pudo monitorizar la evolución de la pluma de contaminante.

Los resultados de las pruebas que se van a mostrar a continuación, se obtuvieron monitorizando la nube de polvo a través de las zonas en penumbra generadas con un foco de luz al estallar y producirse la dispersión del material pulverulento (globo cargado con 2 g del simulador seleccionado) generándose así un aerosol. Para los primeros ensayos hasta la depuración de las técnicas experimentales y los tiempos de ensayo, únicamente se ensayó con productos de uso común como son el $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$, $NaHCO_3$ y $NaCl$. Estos tres compuestos fueron seleccionados como

representativos de las diferentes propiedades fisicoquímicas de todos los simuladores atendiendo a las siguientes razones:

- Tienen un comportamiento diferente frente a la niebla (es decir, interacción agua - sólido). Mientras que NaCl y NaHCO_3 presentan una afinidad clara para interactuar con el agua (niebla), el $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ no tiene ninguna afinidad a la interacción química con el agua al tratarse de un silicato compuesto en su mayoría por MgO ($\approx 32\%$) y SiO_2 ($\approx 65\%$).
- Solubilidad. Se eligieron estos compuestos basándose en su solubilidad, se seleccionó el valor más bajo y uno de los más altos.
- Área superficial específica y densidad de las partículas suspendidas. Estas propiedades tendrán una fuerte influencia en la interacción entre los sustitutos y la niebla. Las partículas de mayor tamaño tenderán a caer por sí solas por efecto de la gravedad y ayudadas por el agua, sin embargo las partículas de menor tamaño permanecen un tiempo elevado suspendidas en la atmósfera, siendo estas las partículas más interesantes a estudiar. Si bien es cierto, que estas partículas de menor tamaño son las más problemáticas y dañinas para la salud, aquellas que presenten una mayor superficie específica para interactuar con el agua se hidrolizarán a mayor velocidad. Esto a su vez dependerá fundamentalmente, como se ha comentado anteriormente, de la afinidad de estas partículas por el agua. Además, como no podía ser de otra manera, una mayor densidad favorecerá la caída de estas partículas dispersadas.

En estos ensayos se observó la evolución de las nubes de material pulverulento o aerosoles a T_{amb} ($\approx 25\text{ }^\circ\text{C}$). Dadas las temperaturas de las paredes, pudo observarse en la zonas de penumbra de los vídeos grabados las corrientes térmicas que se generaban en la sala y pudo seguirse el movimiento de la pluma de contaminante.

En los ensayos realizados se observa cómo el $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ es el compuesto que presenta un mayor TOF, seguramente debido a su tamaño de partícula, así como a su comportamiento apolar y la nula interacción de las partículas suspendidas con el medio. Los ensayos realizados permitieron determinar y cuantificar que después de 15 min aún pueden verse numerosas partículas suspendidas en el ambiente (ver Figura 232).

Otros materiales pulverulentos dispersados, como es el caso del NaHCO_3 , presentan un TOF aparente menor. Como se puede constatar en las imágenes captadas gracias al sistema CCTV instalado (ver Figura 233), la deposición de las partículas es prácticamente total a los 15 min, siendo sensiblemente menos numerosas el número total de partículas dispersadas con respecto a los ensayos realizados con $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.

El aerosol generado con partículas de NaCl presenta un comportamiento totalmente opuesto al de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, pocos minutos después del disparo realizado apenas se observa material en suspensión. Este hecho puede deberse a la elevada humedad del laboratorio y el comportamiento hidrofílico de la sal, que produce una rápida absorción

del contenido de agua del aire, lo que aglomera las partículas y propicia su rápida caída (ver Figura 234). Es por ello, que no se realizaron más ensayos con este compuesto.

A continuación, se muestran diversas imágenes secuenciales de la evolución de las nubes de material pulverulento generadas con los diferentes compuestos estudiados.



t = 0 min. Dispersión del material.



t = 1 min.



t = 2 min.



t = 3 min.



t = 4 min.



t = 5 min.



t = 10 min.



t = 15 min.

Figura 232. Evolución de la nube de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.



t = 0 min. Dispersión del material.



t = 1 min.



t = 2 min.



t = 3 min.



t = 4 min.



t = 5 min.



t = 10 min.



t = 15 min.

Figura 233. Evolución de la nube de NaHCO_3 .



t = 0 min. Dispersión del material.



t = 1 min.



t = 2 min.



t = 3 min.



t = 4 min.



t = 5 min.



t = 7 min.



t = 10 min.

Figura 234. Evolución de la nube de polvo de NaCl.

En base a estos resultados, se dio por optimizado el proceso de dispersión de los agentes simuladores, por lo que se procedió a medir el TOF de todos los compuestos seleccionados en el siguiente punto del presente trabajo de investigación.

4.7 Tiempo de vuelo de las partículas

Una vez monitorizada la evolución de las nubes de material pulverulento y observado su comportamiento, así como la repetitividad de los ensayos y su cuantificación, se procedió a contabilizar el número de partículas suspendidas y a determinar cuantitativamente su tiempo de caída.

Para ello, se realizaron una serie de ensayos repetitivos, los cuales tenían por objeto determinar el TOF de las partículas. El procedimiento experimental seguido implicaba: i) registro de blanco del laboratorio – comprobación de la ausencia de aerosoles en el ambiente; ii) explosiones de cada uno de los simuladores elegidos (t_0), iii) seguimiento y evolución de la densidad de aerosoles suspendidos hasta que hallan precipitado por efecto de la gravedad en el laboratorio y iv) accionamiento de los filtros de limpieza una vez detenido el medidor de partículas para la entrada segura al laboratorio.

Todos los ensayos se realizaron en el COUNTERFOG - Lab a una temperatura y humedad fija y controlada de 10 °C y 70 - 80 % H, respectivamente. El motivo de la disminución de la temperatura para estos ensayos fue evitar las corrientes térmicas que pudieran provocar efectos de resuspensión de los aerosoles y falsear la determinación del TOF de cada uno de los materiales.

Los resultados de la evolución del número de partículas de los aerosoles, que se muestran a continuación en la presente memoria de investigación, han sido representados en escala semilogarítmica. Únicamente se han representado los tamaños medidos más representativos, en base al tamaño de partícula de los simuladores seleccionados, en función del tiempo. Es importante remarcar que, en general, se han seleccionado el PM 10 y PM 5 al ser parámetros utilizados por la comunidad científica para cuantificar la calidad del aire y así como para realizar evaluaciones medioambientales como son los Planes de Vigilancia Ambiental exigidos por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. Este valor indicaría el número de partículas con un tamaño de partícula igual o superior a 10 y 5 μm , respectivamente.

Todos las medidas y datos que se presentan en este apartado son reproducibles y se realizaron al menos 5 veces (o más en número impar en función de los requerimientos de los ensayos) para poder demostrar su reproducibilidad. Es importante remarcar que el COUNTERFOG - Lab permite realizar ensayos reproducibles, a partir del control de todas las variables del sistema involucradas para la determinación del TOF de los aerosoles. Para todos los simuladores (surrogates en terminología sajona) ha sido posible realizar ensayos repetitivos y determinar su TOF.

4.7.1 Talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)

La serie de ensayos realizados permitió observar que el $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ es uno de los compuestos más sencillos de suspender en el ambiente. Esto es debido a sus características fisicoquímicas y a su pequeño tamaño de partícula. Como se observa en la Figura 235, la nube de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ es estable por encima de los 45 min. Se muestran los rangos entre 5 -10 μm y las partículas \geq de 10 μm . Esto es debido a su $D_{0.5}$ de 8.46 μm y su $D_{0.9}$ de 11.91 μm . La proporción de las partículas entre 5 -10 μm es ligeramente superior, lo que concuerda con su histograma de distribución de partículas, y estas perduran más en el tiempo debido a su mayor ligereza.

4.7.2 Bicarbonato sódico (NaHCO_3)

En cuanto al NaHCO_3 , en la Figura 236, puede observarse la evolución de las partículas iguales o mayores de 10 μm respecto al tiempo. En este caso se han obviado el resto de los intervalos tamaños de partículas medidos, ya que solo proporcionan información del fondo. El $D_{0.1}$ de este compuesto es de 14.54 μm , por lo que solo vemos partículas representativas en el rango de partículas mayores de 10 μm .

Como en el caso del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, se determinó que numerosas partículas perduran en el tiempo, pero sí se pudo observar que las partículas de NaHCO_3 tienden a caer más deprisa que las de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Esto es debido a su mayor tamaño de partícula, asimismo se observa que el número de partículas dispersado en t_0 es menor.

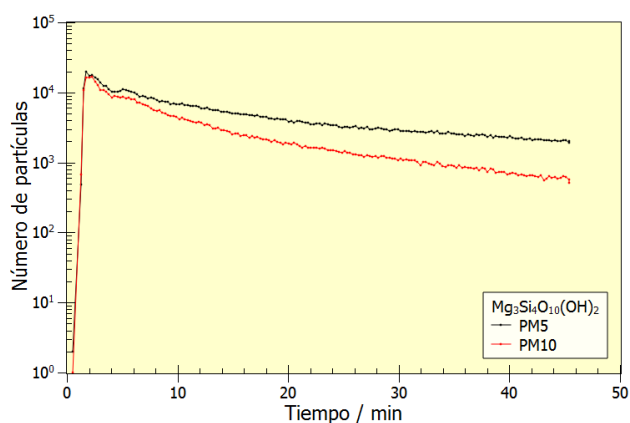


Figura 235. Evolución de la nube dispersada de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.

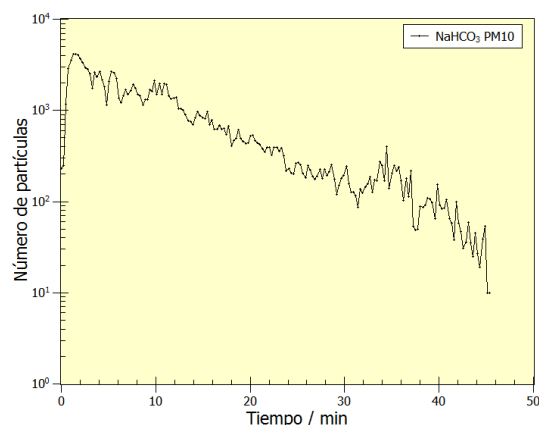


Figura 236. Evolución de las partículas de NaHCO_3 dispersadas.

4.7.3 Cloruro de cesio (CsCl)

Para el CsCl , como en el caso anterior, se ha seleccionado el rango representativo de partículas \geq 10 μm , debido a que su $D_{0.1}$ es de 70.27 μm .

A modo representativo de la serie de ensayos realizados con los aerosoles de este material, en la Figura 237 se observa la evolución del número de partículas suspendidas en el ambiente del COUNTERFOG - Lab. Si se comparan estos resultados

con los obtenidos con los materiales antes presentados, es constatable y cuantificable la precipitación más acelerada de aerosoles de CsCl generados.

Uno de los principales problemas para la realización de estos ensayos, y que fueran reproducibles, fue conseguir que se produjera la dispersión homogénea de los aerosoles de CsCl en el ambiente. Al ser este un material muy higroscópico reacciona con la humedad ambiental, lo que incrementa el peso de las partículas por sorción (absorción y adsorción), llegándose incluso a favorecer procesos de aglomeración que incrementan aún más su peso y facilitan su precipitación. Otra característica importante de este material es su densidad ($3.99 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), característica intrínseca del material que facilita su tendencia a precipitar. Este es el compuesto de todos los ensayados, cuyo aerosol generado tiene un TOF menor.

4.7.4 Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)

En cuanto al compuesto de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, como en los casos anteriores, únicamente se han tomado como representativos la curva de las partículas iguales o mayores a $10 \mu\text{m}$.

La evolución del número de partículas suspendidas de este compuesto muestra una tendencia decreciente principalmente asociada a la densidad y a su interacción con la humedad existente en el laboratorio. En los ensayos realizados se pudo medir que para $t > 20 \text{ min}$ la población de aerosoles suspendidos se había reducido en gran medida (es decir, más de un 80 %, ver Figura 238).

Para poder justificar este comportamiento es necesario recordar que la caracterización del material base demostró que en la distribución del tamaño de partículas de este material existen tamaños de partículas 1 orden de magnitud mayores que los compuestos mostrados con anterioridad (es decir, $D_{0.9} = 242.09 \mu\text{m}$), lo que hace que la gravedad tenga un mayor efecto sobre ellas, y por ende, su sustentabilidad en el aire es menor.

Es conveniente recordar que en todos los ensayos realizados con este material, y con el resto de compuestos, se ha intentado que en el t_0 el número de partículas alcance un valor mínimo de 1000 para poder comparar con el resto de materiales. Únicamente el CsCl está por debajo, siendo imposible generar aerosoles compuestos por un mayor número de partículas, aunque estos sí son repetitivos.

Un estudio comparativo de los resultados de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ frente a los de NaHCO_3 , por ejemplo, demuestra que si bien el número de partículas dispersadas (aerosoles) en el instante " t_0 " es similar, al cabo de $t = 20 \text{ min}$ el número de partículas de NaHCO_3 es más elevado que el de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ al presentar este aerosol un mayor tamaño de partícula, lo que se traduce en un TOF menor.

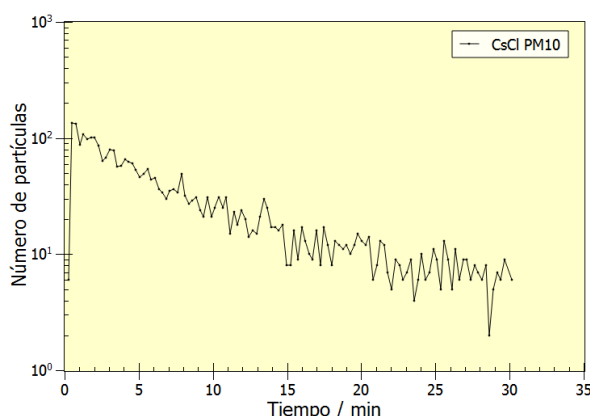


Figura 237. Evolución de las partículas de CsCl dispersadas.

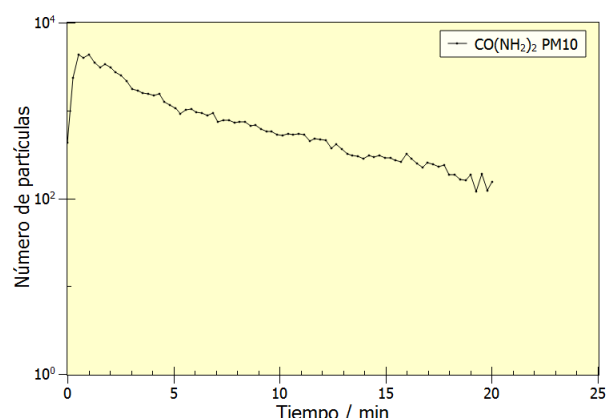


Figura 238. Evolución de las partículas de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ dispersadas.

4.7.5 Fosfato potásico (KH_2PO_4)

Los ensayos realizados con aerosoles de KH_2PO_4 muestran una evolución similar a los casos anteriores.

En la Figura 239 se muestra la evolución del número de partículas suspendidas PM10 (es decir $d \geq 10 \mu\text{m}$). Es importante recordar que en la caracterización del material base se midió que el material presentaba un $D_{0.1}$ de $14.54 \mu\text{m}$, lo que justifica la selección del rango representado. Si bien los datos presentados corresponden a la población con tamaño $\geq 10 \mu\text{m}$, es de esperar, por las discusiones ya expuestas con anterioridad, que tamaños superiores a este PM10 precipiten con una mayor facilidad.

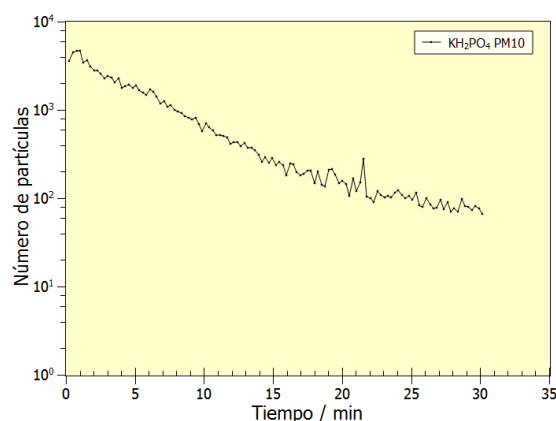


Figura 239. Evolución de las partículas de KH_2PO_4 dispersadas en el tiempo.

Los resultados obtenidos de los aerosoles generados con este material permiten aseverar que la evolución del número de partículas muestra una tendencia decreciente suave lo que provoca que para un $t > 30 \text{ min}$, si bien el número de partículas de KH_2PO_4 se ha recudido en más de un 90 %, el número de partículas en la sala de ensayo es aún superior a 100.

El comportamiento observado en esta serie de ensayos es muy similar al medido con los aerosoles de NaHCO_3 y $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. Otro hecho que se pudo constatar es que si bien la evolución de las partículas en suspensión es muy diferente para cada tipo de aerosol el valor final de partículas en suspensión al que tienden es muy similar. Los resultados obtenidos demuestran que los aerosoles de NaHCO_3 permanecen un mayor tiempo en suspensión que los de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y KH_2PO_4 , comportándose estos dos últimos compuestos de manera similar.

4.7.6 Estudio comparativo de los resultados. TOF de los simuladores NR

En base a los resultados anteriormente presentados, se realizó un estudio comparativo entre los diferentes TOF y la superficie geométrica (S_{geo}) de las muestras, calculada con $D[v, 0.5]$ y la densidad de cada uno de los productos (Ec. <11>).

Para la determinación del TOF de cada uno de los aerosoles, se definió este parámetro como el tiempo necesario para que el número de partículas en suspensión alcance un valor del 10 % respecto al número máximo de partículas suspendidas al inicio del ensayo. Esta definición no asegura la ausencia de aerosoles en el ambiente pero sí permite definir un parámetro que se puede utilizar para cuantificar el efecto de la precipitación por gravedad de los aerosoles, y de esta manera poder cuantificar la eficacia de la contramedida propuesta en la presente memoria de investigación.

$$S_{geo} = \frac{S_{partícula}}{m_{partícula}} = \frac{S_{partícula}}{\rho \cdot \frac{4}{3} \pi r^3} = \frac{3}{\rho \cdot r} \quad <11> [129]$$

En la Tabla XXVII se muestran los valores medidos de $D[v,0.5]$, el área superficial específica calculada y el TOF calculado siguiendo la definición comentada con anterioridad. Los errores asociados a los valores presentados en dicha tabla solo se muestran con el TOF (± 1 min), ya que el valor de $D[v,0.5]$ corresponde con un promedio de al menos 5 ensayos con más de 5000 medidas de tamaño de partícula cada uno.

Tabla XXVII. Resumen de los tamaños y S_{geo} medios de cada uno de los simuladores seleccionados frente al TOF de las partículas medido.

NR	ρ / g·cm ⁻³	$D_{0.5}$ / μ m	S_{geo} / m ² g ⁻¹	TOF ≥ 5 μ m	TOF ≥ 10 μ m
Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2.8	8.46	0.25	80 \pm 1 min	60 \pm 1 min
NaHCO ₃	2.173	24.76	0.11	-	21 \pm 1 min
CsCl	3.99	119.71	0.1	-	13 \pm 1 min
CO(NH ₂) ₂	1.34	204.27	0.02	-	13 \pm 1 min
KH ₂ PO ₄	2.34	24.93	0.10	-	14 \pm 1 min

A partir de los valores mostrados en la Tabla XXVII, y para una mejor comprensión del lector, la Figura 240 muestra los TOF determinados en esta memoria de investigación frente al área superficial geométrica. Al objeto de poder mostrar mejor la distribución de tamaño de partícula de cada uno de los materiales que se han utilizado, se ha representado como valor medio de área superficial geométrica calculado a partir del valor $D[v,0.5]$ y la barra de error horizontal se ha determinado a partir de los valores correspondientes al área superficial específica empleado la ecuación <11> pero considerando los valores de $D[v,0.1]$ y $D[v,0.9]$. De esta manera, es más fácil comprender los TOF determinados en función de la distribución de tamaños de los aerosoles que se han generado en los ensayos. La barra vertical es el error asociado a la determinación del TOF. Este valor es superior al error experimental dado que el sistema permite una captación de datos cada 15 s.

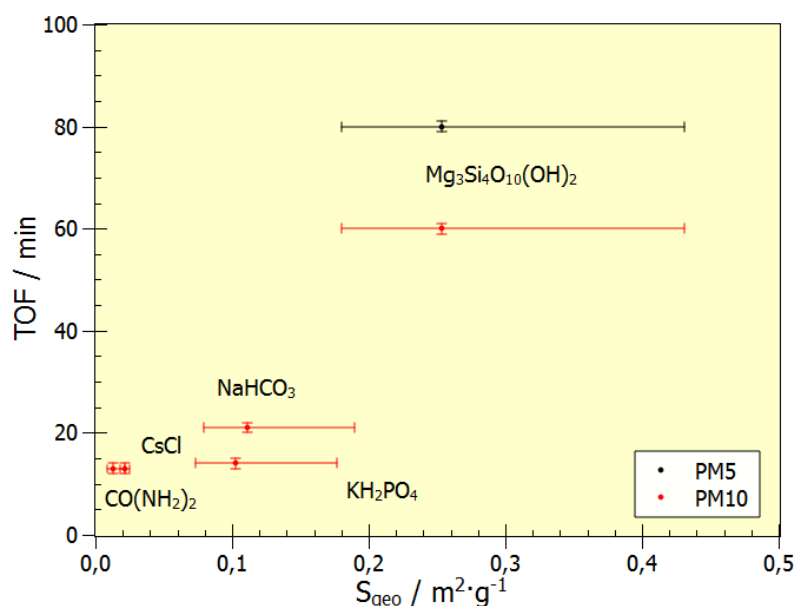


Figura 240. Representación gráfica de las relaciones entre el TOF y S_{geo} .

De los datos presentados en la Tabla XXVII y la Figura 240, se puede constatar como aquellos aerosoles que poseen un menor tamaño de partícula (y por ende una mayor área superficial geométrica específica) presentan una mayor sustentación en la atmósfera del laboratorio. En el caso de los aerosoles de $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ son los que presentan el TOF mayor. Además, los aerosoles generados poseen unas partículas de tamaño tan pequeño que son las más dañinas para la salud. Estos aerosoles con un mayor TOF, pero una elevada razón superficie / volumen, pueden ser una ventaja a la hora de la interacción partícula – gota de niebla, siempre que el material del que está compuesto el aerosol interaccione física o químicamente con la niebla (por ejemplo que sea polar). En caso contrario, exigirá la adición de agentes que faciliten la interacción y su precipitación.

En el caso de los aerosoles con menores tiempo de vuelo (13 min), como son el $CO(NH_2)_2$ y el $CsCl$, dicho comportamiento se puede asociar a que los aerosoles de $CO(NH_2)_2$ son los del compuesto con una distribución de tamaño de partícula mayor y el $CsCl$ es el que posee una mayor densidad, lo que hace que aparezcan más a la izquierda en el eje X y presenten un menor TOF.

En cuanto al comportamiento de los aerosoles de KH_2PO_4 y $NaHCO_3$, presentan unas S_{geo} próximas, hecho que se justifica por la similitud en sus diámetros y densidades. Pero experimentalmente se midió que el $NaHCO_3$ permanece suspendido un tiempo superior. Esto es debido a que el KH_2PO_4 presenta una mayor solubilidad y es higroscópico, por lo que adsorbe y absorbe la humedad más rápidamente que el $NaHCO_3$ y precipita a una mayor velocidad.

4.8 Ensayos de interacción contaminante – niebla. Puesta a punto

Una vez caracterizados los simuladores, optimizado el proceso de dispersión y detección y determinado el TOF de los mismos, se procedió a ensayar estos compuestos frente a las nieblas generadas por las boquillas seleccionadas en las condiciones más favorables de ensayo. En primer lugar, ante el desconocimiento de las combinaciones de presiones de agua y aire más eficientes, y el mejor modelo de boquilla para la generación de una niebla válida para los diferentes tipos de compuestos a ensayar, se realizaron unos ensayos preliminares con unas combinaciones de presiones dadas por la UAH para cada uno de los modelos, en base a su estudio de caracterización de nieblas realizado dicha universidad [96]. Los radionucléidos seleccionados para estos ensayos fueron dos de comportamiento opuesto frente al agua, el $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ y el NaHCO_3 .

Los ensayos fueron realizados a una temperatura ambiente fijada en el laboratorio de 20 °C (esta T^a varía ± 2 °C aproximadamente a lo largo del ensayo, aun empleando agua a esta misma temperatura) favoreciendo así el movimiento de los aerosoles, así como el movimiento de la niebla generada. Este movimiento es necesario para una visualización óptima de los ensayos mediante el sistema CCTV y el efecto Tyndall, ya comentado en el procedimiento experimental, generado por el haz de luz de la linterna LED.

En cuanto a la humedad, al realizar ensayos en serie no se pudo fijar un valor de humedad inferior inicial al 80 %, ascendiendo este valor al 90 - 100% después de la aplicación de la niebla. Los sistemas de control y detección del COUNTERFOG – Lab, permitieron realizar ensayos repetitivos en serie controlando las diferentes variables del sistema como son; T^a , H, $P_{\text{H}_2\text{O}}$, P_{aire} , $Q_{\text{H}_2\text{O}}$ y t.

En la siguiente secuencia temporal (Figura 241) se muestra el proceso seguido en los ensayos realizados en este punto.

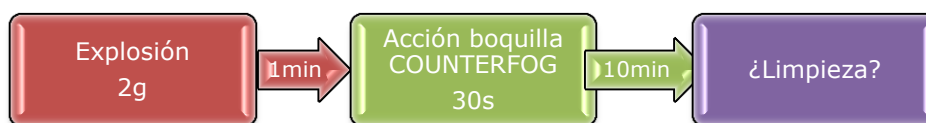


Figura 241. Esquema de proceso seguido en los ensayos preliminares de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ y NaHCO_3 .

Como ya se comentó en el punto 4.1, dadas las características del laboratorio y sus dimensiones, únicamente vamos a probar las boquillas a escala 1:2. Tanto el modelo B como F, se van a probar a bajas presiones de agua y de aire y bajas presiones de agua y medias presiones de aire. Con estas combinaciones lo que vamos a conseguir son nieblas de diferente distribución de tamaño, densidad y tiempo de permanencia. En concreto, a bajas presiones se consumen mayores caudales de agua y se generan nieblas de gota gorda de baja densidad y permanencia, mientras que con la otra combinación de presiones se genera una niebla de gota fina, de elevada densidad y mayor permanencia.

En la Figura 242, puede observarse en detalle las características de las diferentes nieblas generadas por los dos modelos de boquilla, así como sus condiciones de presión de agua y aire.

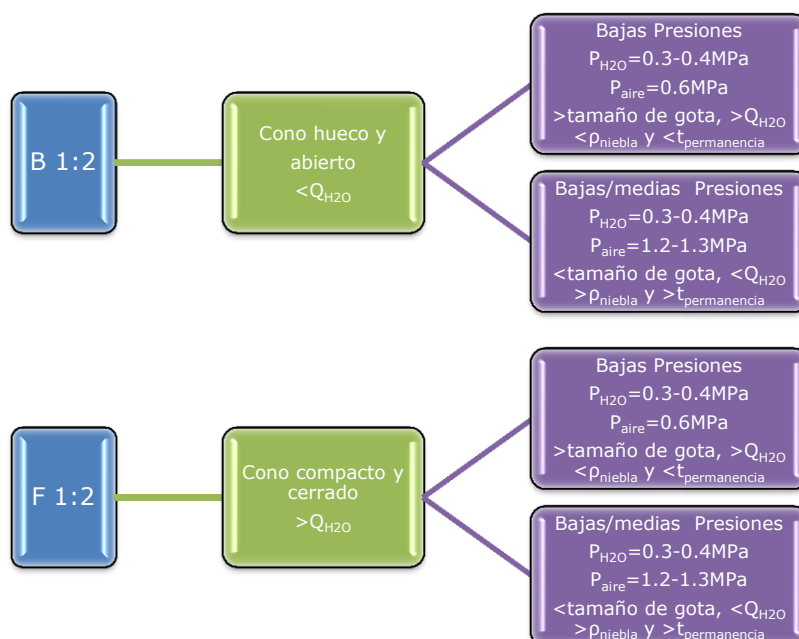


Figura 242. Esquema de los ensayos preliminares monitorizados.

4.8.1 Bicarbonato sódico (NaHCO_3)

Seguidamente, se muestran los resultados de los ensayos preliminares de contacto agente – niebla para el NaHCO_3 , que se realizaron siguiendo los esquemas presentados en el punto anterior.

En la Figura 243, se muestran las imágenes de los ensayos realizados con NaHCO_3 y la boquilla B 1:2 a bajas presiones de aire y agua, mientras que en la Figura 244, se muestran las imágenes capturadas de los vídeos de los ensayos realizados a presiones más elevadas de aire. Este aumento de presión de aire disminuye el caudal de agua consumido por las boquillas con respecto a la otra combinación de presiones, lo que imposibilita su detección al situarse dicho valor por debajo del umbral de detección de los caudalímetros instalados en el COUNTERFOG – Lab.

Por otro lado, en la Figura 245, se pueden observar los resultados obtenidos fruto de la interacción de la niebla generada por la boquilla F 1:2 a bajas presiones de agua y aire, con los aerosoles de NaHCO_3 previamente dispersados. Del mismo modo, en la Figura 246, se muestra la secuencia de la interacción de la niebla generada por la boquilla F 1:2 a mayores presiones de aire con el aerosol de NaHCO_3 .



t = 0 min. Explosión del globo de NaHCO_3 .



t = 1 min.



t = 1 min. Disparo de la boquilla COUNTERFOG.



t = 1 min y 30 s.



t = 2 min.



t = 3 min.

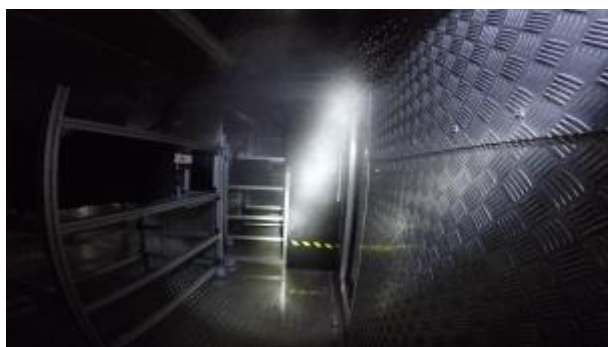


t = 5 min.



t = 8 min.

Figura 243. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando NaHCO_3 como agente NR y la boquilla B 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H = 90\%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 0.6\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}} = 0.05\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.



t = 0 min. Explosión del globo de NaHCO_3 .



t = 1 min.



t = 1 min. Disparo de la boquilla COUNTERFOG.



t = 1 min y 30 s.



t = 2 min.



t = 3 min.



t = 5 min.



t = 8 min.

Figura 244. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando NaHCO_3 como agente NR y la boquilla B 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H = 90\%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.2\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}}$ no registrado. Por debajo del valor mínimo del caudalímetro.

t = 0 min. Explosión del globo de NaHCO_3 .

t = 1 min.



t = 1 min. Disparo de la boquilla COUNTERFOG.



t = 1 min y 30 s.



t = 2 min.



t = 3 min.



t = 5 min.



t = 8 min.

Figura 245. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando NaHCO_3 como agente NR y la boquilla F 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H = 90\%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 0.6\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}} = 0.05 - 0.09\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.

t = 0 min. Explosión del globo de NaHCO_3 .

t = 1 min.



t = 1 min. Disparo de la boquilla COUNTERFOG.



t = 1 min y 30 s.



t = 2 min.



t = 3 min.



t = 5 min.



t = 8 min.

Figura 246. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando NaHCO_3 como agente NR y la boquilla F 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H = 90\%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.3\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}} = 0.04 - 0.07\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.

En el caso de los ensayos con la boquilla F 1:2, sí se pudo detectar el caudal en ambas combinaciones de presiones. Esto quiere decir, que a iguales condiciones de presión las boquillas F requieren un mayor caudal de agua para su funcionamiento.

Gracias a ello, pudo constatarse como al aumentar la presión de aire el caudal de agua disminuye.

De la monitorización de los ensayos realizados pudo concluirse que en ambos modelos de boquilla, a bajas presiones de agua y aire, se genera una niebla de mayor tamaño aparentemente, que precipita rápidamente sin interaccionar en su totalidad con los aerosoles dispersados. En concreto, la niebla generada por la boquilla F 1:2 se deposita en menos de 1 min y la de la boquilla B 1:2 en un tiempo aproximado de 2 min. Este hecho, supone que no se consigue una limpieza efectiva de la sala.

En cuanto a los ensayos realizados a mayores presiones de aire, 1.2 – 1.3 MPa, se consigue un tiempo de permanencia de la niebla de aproximadamente 4 min empleándose la boquilla F 1:2. Por otro lado, la niebla generada por la boquilla B 1:2 permanece suspendida en torno a 7 min. Gracias a estos ensayos, se pudo observar cómo ambas nieblas generadas eran capaces de producir una limpieza aparente adecuada de la sala de ensayo.

Las mayores diferencias entre ambas boquillas radican en que la boquilla B produce un cono hueco, mientras que la boquilla F un cono sólido, lo que implica un ligero aumento caudal de agua requerido por la boquilla F. Además, con la boquilla B 1:2, se observa una niebla muy densa formada por un mayor número de gotas de agua lo que facilita la interacción con los agentes dispersados.

En base a los resultados obtenidos en estos ensayos preliminares, a la caracterización realizada por la UAH y al diseño más sencillo y económico de esta boquilla B, se decidió continuar los ensayos de interacción contaminante - niebla únicamente con la boquilla B 1:2.

4.8.2 Talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)

Tomando como punto de partida los ensayos anteriores con los aerosoles de NaHCO_3 , se realizaron los ensayos pertinentes con el agente hidrófobo $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. El compuesto de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, dada su característica hidrofóbica, plantea dificultades a la hora de ser arrastrado por una niebla compuesta únicamente por agua. Si bien este hecho plantea serias dificultades a la hora de probar la eficiencia de sistemas de respuesta diseñados, es muy útil para ajustar los sistemas de detección y comprobar si después de la caída de la niebla por gravedad persiste el aerosol de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ en suspensión independientemente de la presión utilizada y si se tienen los medios adecuados para detectarlo.

Los ensayos de interacción agente – niebla de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ con la boquilla B 1:2 a bajas presiones de agua y aire se presentan en la Figura 247. Por otro lado, en la Figura 248, se muestran las imágenes secuenciales del ensayo con $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ utilizando mayores presiones de aire, con el fin de generar una niebla más fina que favorezca la interacción partícula de polvo - gota de agua. Este aumento de presión de aire, como en el caso anterior, conlleva una disminución del caudal de agua utilizado con respecto a la otra combinación de presiones.



t = 0 min. Dispersión de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.



t = 1 min.



t = 1 min. Disparo de la boquilla COUNTERFOG.



t = 1 min y 30 s.



t = 2 min.



t = 4 min.



t = 6 min.



t = 10 min.

Figura 247. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ como agente NR y la boquilla B 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H = 90\%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 0.6\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}} = 0.05\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.

t = 0 min. Dispersión de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.

t = 1 min.



t = 1 min. Disparo de la boquilla COUNTERFOG.



t = 1 min y 30 s.



t = 2 min.



t = 4 min.



t = 6 min.



t = 10 min.

Figura 248. Ensayos preliminares de limpieza de sala utilizando $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ como agente RN y la boquilla B 1:2. Condiciones de ensayo: $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H = 90\%$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3\text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.2\text{ MPa}$ y $Q_{\text{H}_2\text{O max}}$ no registrado al estar por debajo del valor mínimo.

En las pruebas experimentales se demuestra que en el caso del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, en cualquiera de las dos combinaciones de presión con la boquilla B 1:2 no se logra una limpieza óptima de la atmósfera.

Dadas las características hidrófobas del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, es necesario incluir un aditivo que reduzca la tensión superficial de las gotas de niebla, aumentando el ángulo de humectabilidad de las gotas de agua y favoreciendo así la fisisorción por las partículas de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Este hecho, aumentaría el peso de las partículas de polvo, lo que las haría caer y beneficiar así a la limpieza de la atmósfera.

Las conclusiones obtenidas de los ensayos realizados podrían parecer que son muy positivas, distando mucho esta afirmación de la realidad, dado que para demostrar la efectividad del sistema es necesario encontrar un aerosol que persista en suspensión incluso después de precipitar la niebla. Con este hecho se pretende determinar la capacidad de detección de diferentes partículas una vez depositada la niebla.

4.9 Efectividad del sistema de contramedida

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el punto anterior del presente trabajo de investigación, el siguiente paso fue determinar de una manera fehaciente la limpieza de una sala contaminada mediante un agente pulverulento de tamaño micrométrico disperso. Para ello, se utilizó el detector de partículas, comentado en capítulos anteriores, que nos permite verificar la efectividad de la boquilla B 1:2 frente a los diferentes agentes simuladores NR dispersados en la atmósfera.

Para estos ensayos, se repitió el proceso experimental descrito anteriormente en la Figura 241. En base a los ensayos de medida del TOF de los simuladores seleccionados, se determinó un tiempo de estabilización del compuesto característico para cada uno de los simuladores. Para todos los ensayos el tiempo de accionamiento de la boquilla fue de 30 s y el tiempo de espera de deposición de la niebla fue de 20 min para los compuestos hidrofílicos y de 45 min para el compuesto hidrofóbico. El motivo de la prolongación del tiempo en los ensayos con el compuesto hidrofóbico fue constatar si el material pulverulento se mantiene en suspensión después de la deposición de la niebla. La deposición de la niebla se produce en torno a los 15 – 20 min.

Entre los diferentes ensayos, se activaron los filtros de limpieza para eliminar las posibles partículas de ensayos anteriores. Principalmente, esto afecta a los ensayos en los cuales la limpieza no ha sido efectiva, pero por razones de seguridad se realiza tras cada ensayo antes de entrar a la sala para preparar el siguiente ensayo [94]. Asimismo, como en el caso de la medida del TOF de las partículas (punto 4.7 del presente trabajo de investigación) se realizó un blanco antes de los ensayos para determinar el fondo del laboratorio si fuera necesario. Además, en los ensayos del compuesto hidrofóbico de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, debido al hecho de ser un compuesto no polar, se realizaron ensayos con los diferentes tensoactivos seleccionados.

En la Tabla XXVIII, se resumen los tiempos secuenciales de cada uno de los ensayos. En esta tabla se han plasmado los diferentes tiempos de referencia considerados como son:

- El " $t_{\text{dispersión}}$ " que es el tiempo de espera para lograr una homogénea distribución y estabilización de la nube de contaminante en la atmósfera del laboratorio después de la explosión del globo.
- " t_{disparo} " que corresponde al período durante el cual la boquilla está generando niebla.
- " t_{ensayo} " que es el tiempo que se deja actuar a la niebla en la sala de ensayo para comprobar si es capaz de generar una limpieza efectiva de la sala.

Y por último, se presenta en dicha tabla si ha sido necesaria la adición de aditivos al agua para ayudar a una limpieza efectiva de la sala de ensayo.

Tabla XXVIII. Tiempos considerados para los ensayos de descontaminación.

Simulador	$t_{\text{dispersión}}$ / min	t_{disparo} / s	T_{ensayo} / min	Aditivos
NaHCO ₃	2	30	30	
CsCl	1	30	30	
CO(NH ₂) ₂	1	30	30	
KH ₂ PO ₃	2	30	30	
Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	3	30	45	Isopropanol / Bio - Sel

En cuanto a las condiciones de los ensayos, estos ensayos se realizaron a una temperatura de 10 °C, para evitar posibles corrientes térmicas, con agua de la red general del CIEMAT estabilizada a una temperatura de 10 °C y con la boquilla B 1:2 a 0.4 MPa de H₂O y 1.8 MPa de aire. La humedad medida durante los ensayos varía entre el 70 – 90 %, llegándose a registrar humedades máximas del 100 % en algunos momentos durante los ensayos. El ligero aumento de la presión de aire, con respecto a los ensayos mostrados en el punto 4.8, se ha realizado en base a los experimentos de caracterización de nieblas de la UAH, para favorecer un tamaño de gota menor y de mayor permanencia que optimice la interacción con el agente contaminante.

4.9.1 Simuladores hidrofílicos

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos de limpieza de atmósferas contaminadas con una nube de material pulverulento con carácter hidrofílico. De estos compuestos se espera una interacción positiva con las gotas de niebla generadas por la boquilla B 1:2 a 0.4 MPa de H₂O y 1.8 MPa de aire. Recordar que estos ensayos se realizaron a una T^a en sala de 10 °C, una T_{H₂O} de 10°C y sin ningún aditivo.

En cuanto a los gráficos representados en los siguientes puntos, se muestran las partículas PM 10 ($\geq 10 \mu\text{m}$) detectadas tras la explosión de los contaminantes, debido al tamaño de los mismos ya comentado en el punto 4.7, y las partículas PM 5 ($\geq 5 \mu\text{m}$) y PM 10 tras el disparo de la boquilla COUNTERFOG. La niebla generada está compuesta por una mayor dispersión de tamaños de gota, siendo los tamaños seleccionados los más influyentes en los experimentos realizados, debido a ser los más próximos a los aerosoles de los simuladores ensayados.

4.9.1.1 Bicarbonato sódico (NaHCO_3)

En la Figura 249, se puede observar la acción de la niebla dispersada sobre el NaHCO_3 suspendido en el aire. En el gráfico se puede observar la explosión del globo cargado con NaHCO_3 , su estabilización y el disparo de la niebla en torno a los 2 – 3 min. Finalmente, puede seguirse la curva de caída de la niebla característica. En torno a los 10 – 13 min desde el disparo de la niebla, esta comienza a caer a una mayor velocidad, no detectándose aerosol ninguno a los 16 – 17 min desde el accionamiento del sistema contramedida.

De estos resultados, puede extraerse la conclusión de que la niebla generada por la boquilla B 1:2 a 0.4 MPa de H_2O y 1.8 MPa de aire, es capaz de arrastrar el compuesto de NaHCO_3 dispersado, ya que después de la caída de la niebla no se detectan partículas en suspensión. Se consigue la deposición completa del aerosol de NaHCO_3 .

En los ensayos de caracterización del NaHCO_3 disperso, se determinó un TOF de este compuesto de 21 min, pero a los 40 min desde el inicio del ensayo aún se registraban partículas de NaHCO_3 dispersas (ver Figura 236). Esto quiere decir que se ha reducido a la mitad el tiempo de exposición al contaminante. Además, en los ensayos de determinación del TOF, nunca se llegan a depositar todas las partículas de contaminante suspendidas.

Estos resultados corroboran cómo el comportamiento hidrófilo y la solubilidad de los contaminantes favorece la interacción entre las partículas sólidas dispersas y la niebla, produciéndose así una limpieza efectiva de la atmósfera de laboratorio.

4.9.1.2 Cloruro de cesio (CsCl)

Para el supuesto de los aerosoles de CsCl , se aprecia como el tiempo de estabilización de este aerosol es menor que para el caso del NaHCO_3 . Asimismo, se observa de nuevo la evolución del proceso de ensayo por completo (Figura 250).

Inciendiando con mayor interés sobre la evolución de los aerosoles dispersos en la sala de ensayo, puede observarse como después de 17 – 18 min desde el inicio del experimento, la niebla se ha depositado por completo arrastrando consigo las partículas dispersas de CsCl .

En la caracterización previa (ver Figura 237) a los 30 min aún se detectaron partículas dispersas residuales, sin embargo, en estos ensayos tras la aplicación y precipitación de la niebla, no se detectan partículas en el ambiente.

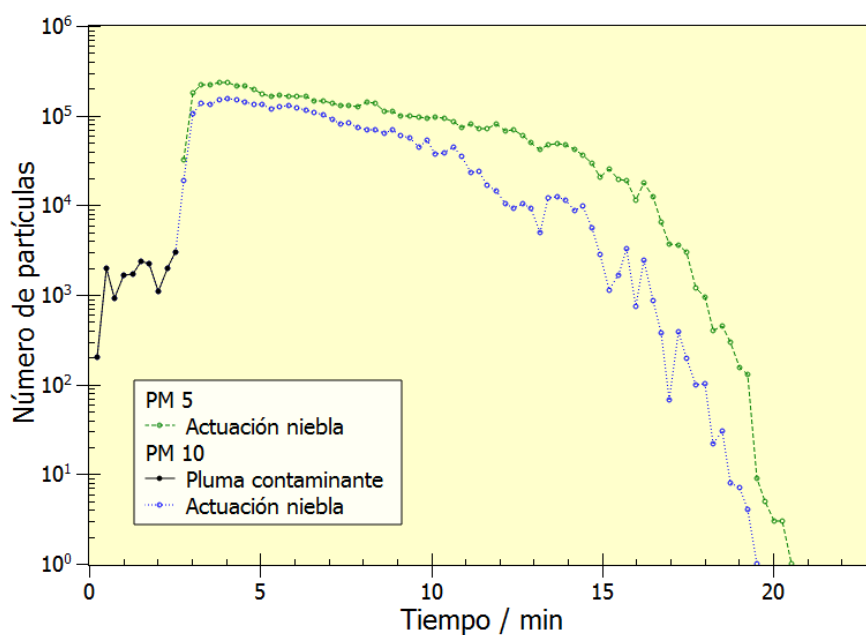


Figura 249. Evolución de la explosión de NaHCO_3 , la dispersión de niebla posterior con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4 \text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8 \text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30 \text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.

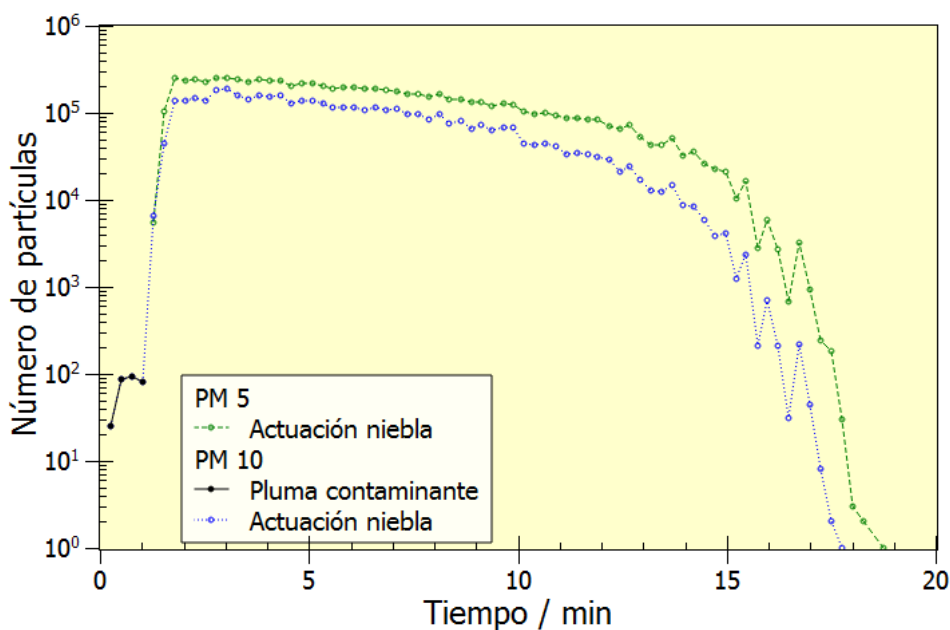


Figura 250. Evolución de la explosión de CsCl , la dispersión de niebla posterior con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4 \text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8 \text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30 \text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.

4.9.1.3 Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)

En cuanto al $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, en la Figura 251, puede apreciarse cómo la dinámica de las partículas es semejante al caso del NaHCO_3 . El número de partículas suspendidas a t_0 es similar y superior a 1000, hecho que no se reproduce en los ensayos de CsCl . Sin

embargo, en este compuesto se redujo el tiempo de estabilización, debido a su tendencia a caer por sí mismo.

Una vez que se dispara la niebla, como en los casos anteriores, el aerosol de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ se disuelve en ella y su comportamiento se aproxima al de la niebla por sí sola, cayendo bruscamente a partir de los 11 min y desapareciendo por completo a los 16 min desde el disparo de la niebla. Como en los casos anteriores, se logra una limpieza completa y efectiva de la atmósfera.

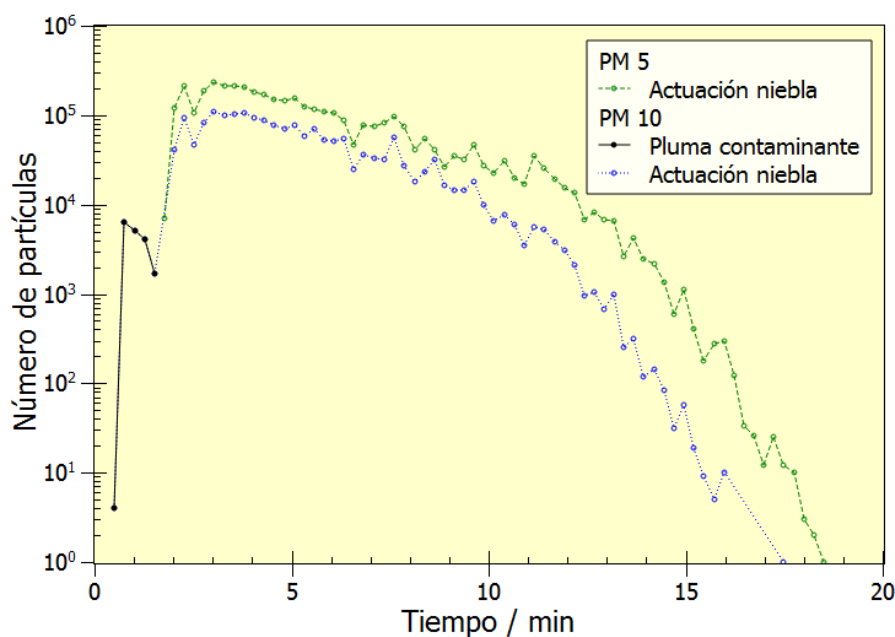


Figura 251. Evolución de la explosión de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, la dispersión de niebla posterior con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4 \text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8 \text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30 \text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.

4.9.1.4 Fosfato potásico (KH_2PO_4)

El KH_2PO_4 , junto con el $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y el CsCl , presentan los menores TOF determinados en base al 10 % de las partículas dispersadas inicialmente. Pero aun así, a los 30 min, en los ensayos de determinación del TOF, se detectaban partículas suspendidas (ver punto 4.7.5).

En la Figura 252, se muestran los resultados obtenidos al enfrentar a la niebla generada por la boquilla B 1:2 un aerosol del compuesto KH_2PO_4 . Como en los ensayos anteriores se aprecia la dispersión y estabilización del compuesto diseminado, así como el disparo de la niebla y la caída de la misma arrastrando el aerosol de KH_2PO_4 por completo en menos de 20 min.

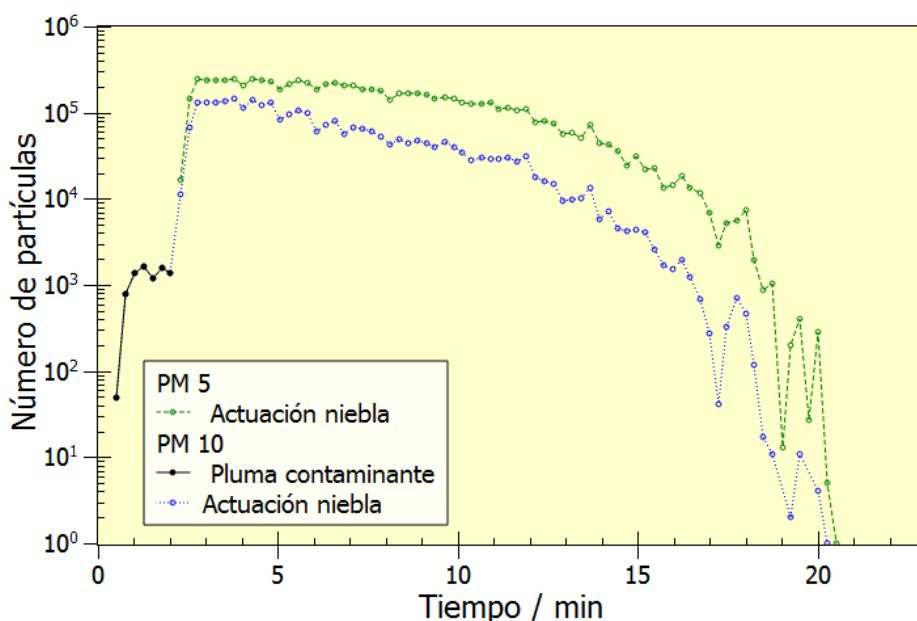


Figura 252. Evolución de la explosión de KH_2PO_4 , la dispersión de niebla posterior con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4 \text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8 \text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30 \text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.

La conclusión final que puede extraerse en base a los resultados obtenidos al enfrentar un aerosol compuesto por partículas hidrofílicas a la niebla generada por la boquilla B 1:2 a una presión de agua de 0.4 MPa y una presión de aire de 1.8 MPa, es que se consigue una completa limpieza de la atmósfera contaminada. Esto conlleva a una reducción del tiempo de permanencia de un compuesto pulverulento hidrófilo disperso en la atmósfera.

4.9.2 Simulador hidrofóbico

En base a resultados experimentales previos (ver punto 4.8.2), se pudo constatar que el $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ no presenta interacción alguna con la niebla generada y permanece disperso en la sala del laboratorio, incluso cuando la niebla ya ha caído. Esta evidencia es una consecuencia del comportamiento hidrofóbico del compuesto.

Debido a esto, se estudiaron diferentes tensoactivos para adicionar a la niebla y favorecer la flexibilidad de las gotas la misma. Con ello se pretende que las gotas de niebla, con el aditivo seleccionado disuelto, interaccionen con el aerosol de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ favoreciéndose así su precipitación.

La elección de los dos tensoactivos a utilizar (Bio – Sel e isopropanol) se comentó en el punto 3.6. Gracias a los estudios de Orellana et al [106], colaboradores del proyecto, se establecieron los porcentajes máximos a utilizar de cada uno de ellos en base a sus estudios realizados en ratones y peces cebras (Bio-Sel al 0.5 % v / v e isopropanol al 1 % v / v). La solución empleada ha de ser respetuosa con el medioambiente e inocua para la salud.

Los ensayos se realizaron de nuevo, como en el caso de los experimentos anteriormente expuestos, con la boquilla B 1:2 a 0.4 MPa de H₂O y 1.8 MPa de aire. Estos ensayos se realizaron a una T de 10 °C y una T_{H₂O} de 10 °C. En este caso, se muestran las partículas PM 5 ($\geq 5 \mu\text{m}$) y PM 10 ($\geq 10 \mu\text{m}$) detectadas tras la explosión del contaminante, debido al tamaño medido del mismo ya comentado en el punto 4.7, y las gotas de niebla de PM 5 y PM 10, debido a ser los tamaños más relevantes y próximos al aerosol apolar seleccionado.

4.9.2.1 Talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)

Como se observó en la caracterización de las partículas de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, una vez dispersadas en el ambiente, un elevado porcentaje de ellas permanecen suspendidas en la sala de ensayo un largo periodo de tiempo. Este hecho pudo observarse nuevamente de una manera fehaciente con la utilización del detector de partículas.

En el gráfico presentado en la Figura 253, se observa la explosión del globo cargado con los 2 g de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ y su estabilización en torno a 1000 partículas tanto de PM 10 como de PM 5. A continuación, se observa un crecimiento del número de partículas debido a la aplicación de la niebla, tal y como se había comprobado en los ensayos con los compuestos hidrofílicos. En torno al minuto 12, tras haber dispersado la niebla, ésta comienza a caer más rápidamente. Pero a diferencia de los casos anteriores, esta niebla no arrastra consigo las partículas dispersas de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, ya que una vez transcurridos 20 min desde el inicio del ensayo, se siguen detectando partículas PM 5 y PM 10 correspondientes al $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Además, se puede apreciar una estabilización de las partículas dispersas de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ perdurando por encima de los 50 min.

Si bien no se ha logrado una limpieza de la sala contaminada, sí puede destacarse que comparando este gráfico de la Figura 253 con el gráfico de la determinación del TOF del $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (Figura 235), se observa que el número de partículas a los 20 min es un orden de magnitud menor. Esto significa que se ha conseguido arrastrar parte de las partículas dispersas, siendo esta limpieza insuficiente.

Comprobada a ineffectividad de las gotas de agua por sí solas a la hora de la interacción agente contaminante – niebla, se procedió a la realización de los ensayos pertinentes con los dos aditivos seleccionados a las concentraciones dadas (Bio-Sel al 0.5 % v / v e isopropanol al 1 % v / v).

En la Figura 254, se presentan los resultados obtenidos utilizando el aditivo Bio – Sel al 0.5 % v / v. Como puede observarse, la utilización de este detergente a baja concentración debido a sus efectos secundarios no mejora en gran medida los resultados. Tras la deposición de la niebla permanecen un elevado número de partículas dispersas en el ambiente (PM 5 \approx 1000 y PM 10 \approx 100). Destacar que en el ensayo representado en la Figura 254, las partículas dispersadas a t_0 son de un orden de magnitud superior, por lo que tanto la aplicación de la niebla sin aditivos, como la niebla con Bio – Sel, reducen en un orden de magnitud las partículas dispersas de los aerosoles resultantes.

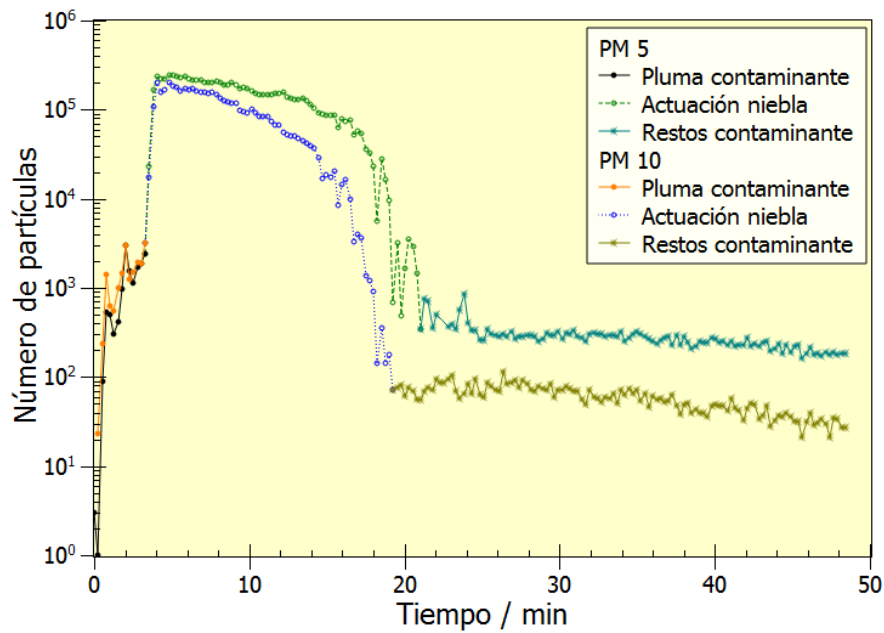


Figura 253 Evolución de la explosión de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, la dispersión de niebla posterior con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4 \text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8 \text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30 \text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.

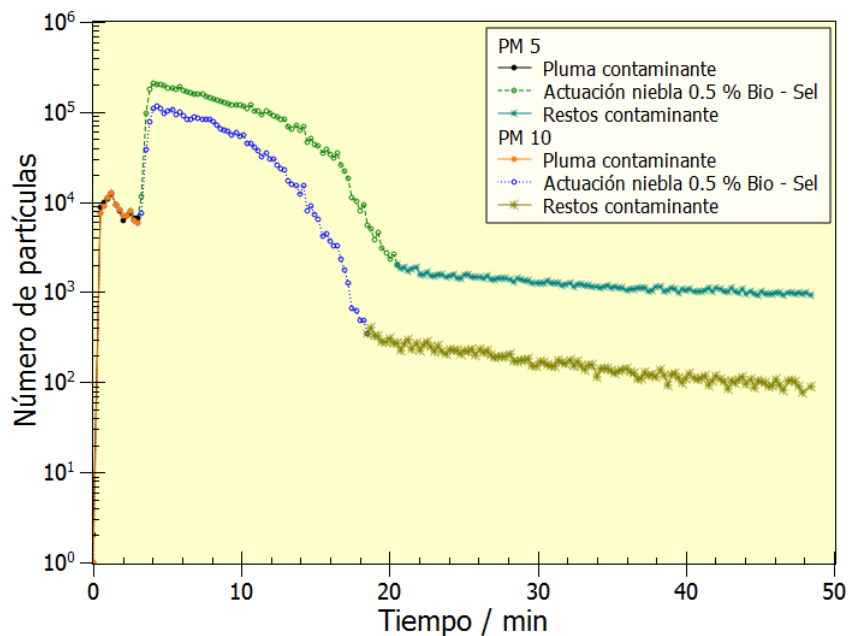


Figura 254 Evolución de la explosión de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, la dispersión de niebla posterior al 0.5 % de Bio - Sel con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4 \text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8 \text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30 \text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.

Como en el caso anterior esta limpieza no puede considerarse efectiva, por lo que se procedió a la experimentación con el segundo aditivo seleccionado.

En la Figura 255, se muestra un ensayo representativo de los resultados obtenidos de los ensayos realizados con isopropanol al 1 % v / v. En esta gráfica, se observa el disparo de polvo y su estabilización, el disparo de la niebla y la curva característica de deposición de la misma. En este caso, cuando la niebla se ha depositado no se observan partículas dispersas en el ambiente como en los ensayos anteriores, por lo que se puede afirmar que se ha conseguido una limpieza efectiva de la atmósfera contaminada. En menos de 15 min desde el inicio del ensayo, con un único disparo de niebla de 30 s, se ha conseguido depositar un compuesto hidrofóbico disperso de tamaño micrométrico.

En base a estos resultados, puede afirmarse que el agua en presencia de isopropanol produce una limpieza efectiva de una sala contaminada con un aerosol hidrofóbico, en un menor tiempo que el medido en los ensayos realizados sin este aditivo incluso frente a compuestos hidrofílicos. Esto puede ser debido fundamentalmente a que con el aditivo se favorece el contacto entre agente contaminante – niebla, y además, se ha detectado un aumento del caudal consumido por las boquillas con las soluciones empleadas.

Es importante recordar que, tal y como se explicó en el procedimiento experimental (ver punto 3.6), la adición del isopropanol no interfiere en la interacción de las gotas de agua con los compuestos hidrofílicos. A estos resultados, se le suma que el uso de isopropanol es más ventajoso, ya que no es un agente formador de espuma y se trabaja de una manera más sencilla bajo condiciones de alta presión. Además, es menos perjudicial para la salud a la luz de los estudios realizados con embriones de pez cebra y ratones [106].

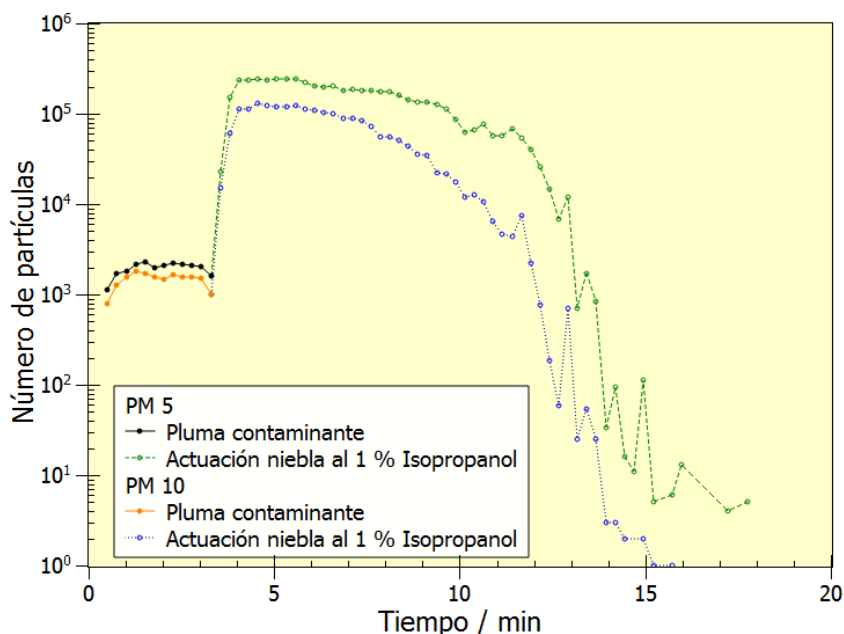


Figura 255 Evolución de la explosión de $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, la dispersión de niebla posterior al 1 % de isopropanol con la boquilla B 1:2 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4 \text{ MPa}$, $P_{\text{aire}} = 1.8 \text{ MPa}$ y $t_{\text{disparo}} = 30 \text{ s}$) y la consecuente deposición de la misma por efecto de la gravedad.

En base a los ensayos realizados, se ha demostrado que el sistema de boquillas COUNTERFOG es capaz de generar nieblas que disuelven y arrastran sólidos dispersos en el ambiente tanto de carácter hidrofílico como hidrofóbico, minimizando su tiempo de permanencia en el aire y su posible dispersión.

4.10 Caracterización de boquillas empleadas

Una vez realizados los ensayos de caracterización de nieblas, así como los primeros ensayos de descontaminación NRBQ, las boquillas presentaban un cierto deterioro debido al gran número de ensayos realizados y a una utilización superior a los 18 meses. Motivo por el cual se decidió sustituirlas, desmontarlas y estudiar en detalle los posibles efectos de corrosión que pudieran estar teniendo lugar en la boquilla.

Destacar que la boquilla más utilizada ha sido la boquilla B 1:2 (Figura 256) y por ende la más afectada, y en menor medida la boquilla F 1:2 (Figura 257). Aun así, debido a las condiciones extremas de humedad existentes en el laboratorio, las boquillas que han permanecido expuestas un tiempo elevado a dicha humedad, aunque no hayan estado en operación continuamente, presentan una corrosión superficial generalizada.



Figura 256. Boquilla B 1:2 tras dos años de experimentación.

Para poder proceder al desmontaje de las boquillas y extraer cada una de las piezas que la componen, fue necesaria su inmersión en un baño de ultrasonidos, lo que

favoreció la disolución de los diferentes precipitados, para así poder proceder a la extracción de las piezas interiores. Además, destacar que la boquilla B 1:2, boquilla afectada en mayor medida, requirió de su inmersión en aceite para favorecer el deslizamiento de las piezas. Dadas las tolerancias, H 7 (en diámetros interiores) y h 6 (en diámetros exteriores), en el caso de las boquillas a escala 1:2 para una medida de 50 mm existe un espacio máximo de 41 μm entre los cilindros interiores y la carcasa exterior para el crecimiento y acumulación de sales, suciedad y productos de corrosión, debido a la presencia de una elevada humedad ambiental.

El estudio de caracterización posensayo demostró que los o - ring han realizado correctamente la función para la que fueron implementados. Estas juntas impiden el paso de agua, tal y como se observa en las caras planas de todas las piezas que han estado en contactos con las juntas de vitón. Este hecho que se aprecia en mayor medida en la boquilla F 1:2 ya que presenta un menor deterioro superficial generalizado (ver marcas en la boquilla F 1:2 en la Figura 257).



Figura 257. Boquilla F 1:2 tras dos años de experimentación.

A estas observaciones y hechos constatados se le suma que en las entradas de agua se encuentran restos de materiales poliméricos que se desprendieron de las juntas del sistema hidráulico de tuberías instalado en el laboratorio (Figura 258). Este hecho es de relevada importancia ya que disminuye el caudal de agua. Por ello, se realizaban inspecciones periódicas a las boquillas para asegurarnos del correcto funcionamiento de las mismas.

Además, los montajes y desmontajes de las boquillas, para las comprobaciones visuales pertinentes, hay que realizarlos con sumo cuidado, ya que un excesivo e incorrecto apriete de los racores puede llevar a la rotura de algunas piezas con la consecuente fuga del fluido involucrado (Figura 259).



Figura 258. Acumulación de residuos poliméricos de las tuberías de entrada de agua.



Figura 259. Rotura de la entrada de aire debido a un mal apriete de la boquilla.

4.10.1 Análisis de las piezas en servicio

Tal y como se ha mostrado en el punto anterior, la boquilla B 1:2 ha sido la más utilizada y por ello ha estado más expuesta a una atmósfera de elevada humedad, así como a diferentes compuestos químicos, desinfectantes, fuego y otros agentes. Esto ha provocado que sea la más afectada a consecuencia de los efectos de la corrosión.

Gracias a una observación más en detalle de cada una de las piezas, pudo apreciarse que además de una corrosión generalizada de todas las piezas, también podrían observarse inicios de corrosión por picadura. En concreto, la carcasa superior (top_flage) es una de las piezas más afectadas presentando diversas zonas de corrosión por picadura (Figura 260 y Figura 261).

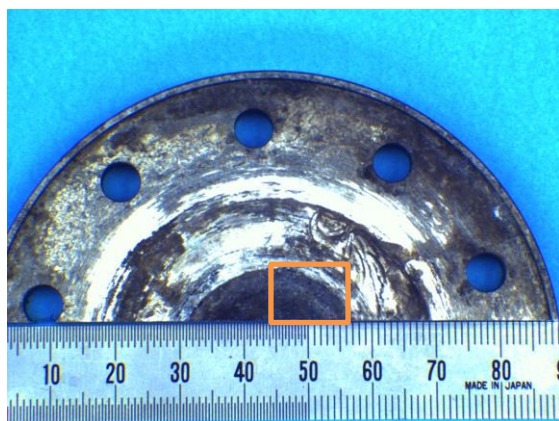


Figura 260. Detalle de la corrosión interna de la carcasa superior.

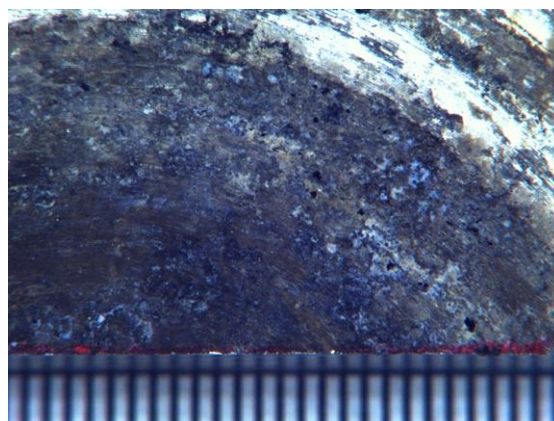


Figura 261. Detalle de la corrosión por picadura de la carcasa superior.

En base a las observaciones realizadas en la lupa se podrían diferenciar varios tipos de corrosión [130]:

- Corrosión generalizada. Esta corrosión se ha producido debido a la exposición de la boquilla a un ambiente con humedad relativa del 100 % durante un largo periodo y en presencia de iones Cl^- .

Asimismo, esta corrosión generalizada se ve acrecentada en las zonas en las cuales ha habido un contacto directo con el agua o con la niebla generada dentro de las mismas.

- Corrosión localizada. Tal y como puede observarse en el detalle de la Figura 261, en el top_flage se iniciaron picaduras de corrosión. El inicio o incubación de la picadura puede darse por aireación diferencial a $\text{pH} \geq 7$, por disolución de una fase minoritaria de la aleación o por la disolución selectiva de inclusiones metálicas. En el tratamiento térmico T6 se producen precipitados endurecedores con presencia de Cu, Zn y Mg. Este tratamiento mejora las propiedades de resistencia mecánica, pero empeora las de corrosión bajo tensión. Estos precipitados disminuyen en general las propiedades frente a la corrosión, pudiendo ser los iniciadores de las corrosiones por picaduras.

Cabe destacar que la zonas donde se han encontrado estas picaduras, marcadas en la Figura 262, son superficies en contacto directo con aire a presión. En base a los diseño teóricos, en esa cámara no debería de entrar agua de forma habitual, sin embargo, en base a las observaciones, se cree que el flujo turbulento generado dentro de la boquilla produce que el agua y la niebla se muevan indistintamente por las zonas internas de la boquilla.

Además, el agua utilizada en muchos casos contenía una cantidad de iones agresivos, como son los iones cloro, superiores a lo normal. Este cloro fue añadido al agua para desinfectar y ha favorecido el efecto de la corrosión al variar el potencial de corrosión. Como se ha comentado, las zonas que presentan esta corrosión por picadura, son zonas en las que el agua no fluye habitualmente, por lo que se pueden estar generando zonas con agua residual que presenten una alta concentración de Cl^- .

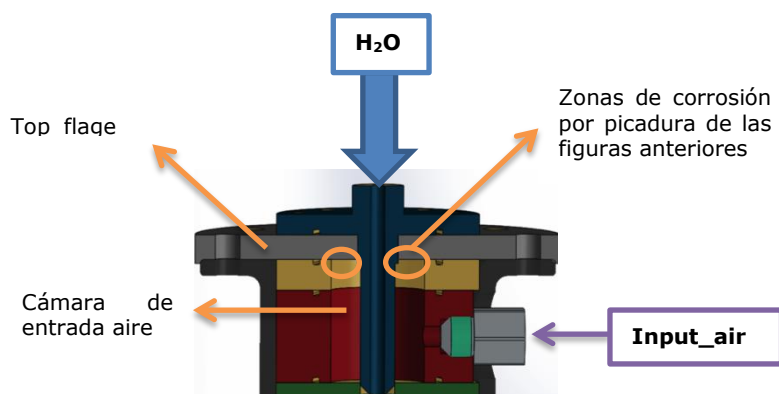


Figura 262. Zona de mayor corrosión mostradas en las imágenes Figura 260 y Figura 261.

Para poder entender el proceso ocurrido en el Al que ha alterado su zona de pasivación, vamos a proceder al estudio de su diagrama de Pourbaix [131]. El Al genera por exposición al aire una capa de 20 - 1000 Å de espesor de alúmina Al_2O_3 . Pero esta capa solo se produce en las zonas de pasivación determinadas por el diagrama de Pourbaix. El Al pasivado genera una capa de hidrargilita $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, que permanece pasiva aproximadamente entre los pH 4 y 8.5 (Figura 263). Estos límites de estabilidad de la zona pasivada dependen de la T^a y de las condiciones ambientales que en el caso del COUNTERFOG - Lab distan de las estándar. Durante el ensayo la boquilla se encuentra en un ambiente acuoso, lo que facilita la movilidad iónica, cuyo principal producto de corrosión es el $Al(OH)_3$. Este hidróxido dará lugar a la formación de un óxido hidratado o una mezcla de óxidos.

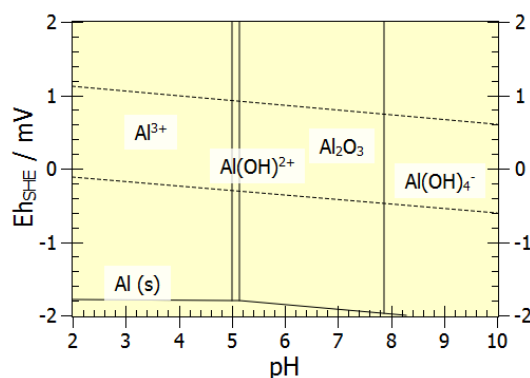


Figura 263. Diagrama de Pourbaix del aluminio realizado con el programa Medusa [116].

Asimismo, en el medio existe una mayor concentración de coluros de lo habitual lo que lleva al metal a atacarse localmente, en particular en resquicios (corrosión por picadura) y en áreas de estancamiento (como puede ser nuestro caso), en las que desaparece la pasividad por la formación de pilas de aireación diferencial.

Además, se ha utilizado Bio - Sel en algunas pruebas y para limpiar el laboratorio. Este compuesto presenta un pH de 9.5, por lo que de nuevo nos saldríamos del rango de estabilidad del aluminio.

Por otro lado, factores ambientales como la temperatura o la turbulencia de la disolución pueden provocar un profundo efecto en la resistencia a la corrosión. En el caso de la temperatura, en la Figura 264, puede observarse el efecto de la misma en el diagrama de Pourbaix. Con la realización de ensayos a bajas temperaturas (10 °C) se desplaza hacia mayores pH el rango de estabilidad y reduce la anchura de su campo de estabilidad. Mientras que a temperaturas por encima de la ambiental (40 °C) el campo de pasivación se desplaza hacia menores pH y se amplía el intervalo de estabilidad ligeramente respecto al de T_{amb} . Además, a bajas temperaturas no se forman los hidróxidos de aluminio.

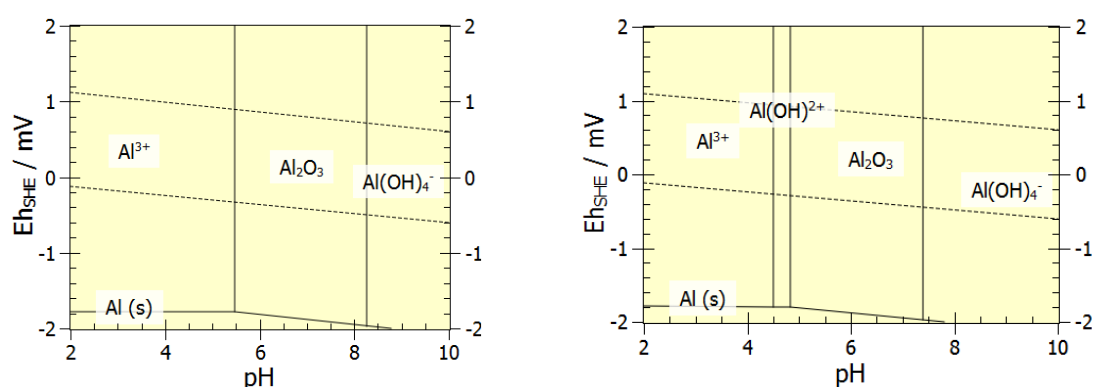


Figura 264. Efecto de la temperatura en el diagrama de Pourbaix. Gráfico a 10 °C y 40 °C, respectivamente.

Y por último, para analizar el efecto a T_{amb} (25 °C) de la concentración de cloruros y carbonatos en la disolución acuosa, se realizó en el diagrama de Pourbaix mostrado en la Figura 265. En este diagrama puede observarse como con la presencia de carbonatos en el agua, se obtiene un nuevo producto de corrosión en la franja del hidróxido de aluminio antes mostrado. Por lo demás, el campo de pasivación permanece estable para las condiciones propuestas.

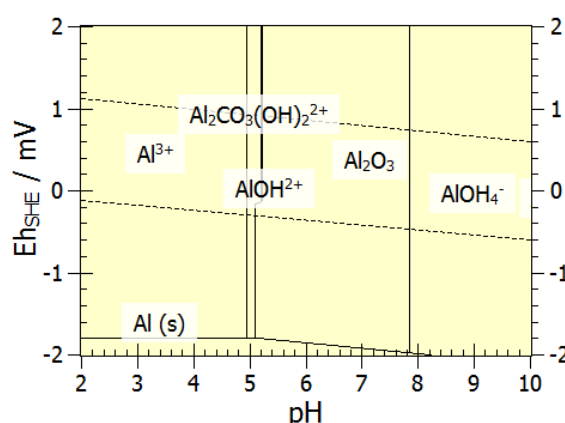


Figura 265. Diagrama de Pourbaix del aluminio a 25°C en presencia de carbonatos y cloruros.

De acuerdo a los resultados obtenidos y los estudios realizados, para favorecer la durabilidad de las boquillas en ambientes adversos, será necesaria la realización de un tratamiento de anodizado, para así favorecer la vida útil de las boquillas finales.

4.10.2 Variación de durezas de la pieza en servicio

Una vez observado el deterioro de las boquilla, se procedió a la medida de dureza de la pieza analizada y a su caracterización microscópica posterior (4.10.3), para estudiar los posible efectos que hubiera podido tener esta corrosión en las propiedades características del material.

En la siguiente tabla (Tabla XXIX) se presenta la dureza Vicker (HV) de la barra original de 50 mm de AA 7075 – T6, las de una pieza mecanizada sin utilizar y las de la pieza mecanizada y en servicio, ambas extraídas de la barra de 100 mm para su comparativa.

En base a los resultados, puede observarse que la barra de 50 mm presenta una mayor dureza y homogeneidad en comparación a las dos piezas mecanizadas extraídas de la barra de 100 mm.

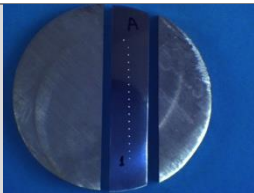
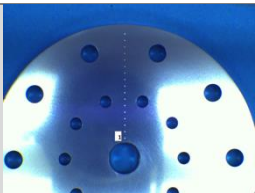
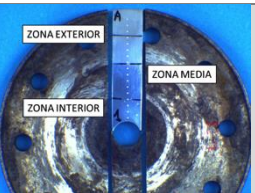
La pieza mecanizada presenta una dureza ligeramente inferior a la de la barra de 50 mm, pero lo más destacable es que se aprecia un aumento gradual de la misma desde el centro hacia los extremos. Este hecho puede ser debido a diferentes factores. Al tratarse de una barra de mayor diámetro, el proceso de extrusión y el tratamiento térmico posterior de precipitación puede haber generado diferencias en el tamaño de grano de la barra al no haberse enfriado a la misma velocidad en los extremos que en el centro, dando lugar un mayor crecimiento de grano en el centro acompañado de una disminución de dureza. O bien, la realización de un elevado número de talados en las zonas exteriores de la pieza, puede haber generado un calentamiento y enfriamiento de la misma afectando así a su tamaño de grano y dureza.

Una solución adecuada que minimizaría los dos efectos anteriormente comentados sería realizar un tratamiento térmico de homogenización T6 a todas las piezas de la boquilla una vez fabricadas. Sus finos espesores permitirían la realización de un tratamiento térmico de endurecimiento adecuado, eliminando los posibles efectos perjudiciales de la variación de la dureza de las piezas mecanizadas y extraídas de barras con un mayor diámetro.

Y por último, es importante destacar que la pieza mecanizada en servicio presenta grandes diferencias respecto a las dos piezas anteriores. Comparándola en concreto con una pieza similar mecanizada sin utilizar, puede comprobarse como se ha producido un descenso generalizado de la dureza en toda la pieza tras el uso. En esta pieza se pueden identificar claramente cuatro zonas con diferente dureza. El área que más ha visto reducida su dureza es la zona central. Esta zona central ha estado en contacto directo con el agua y el aire a presión y presenta una mayor corrosión.

Asimismo, es pertinente destacar que aunque se ha observado una disminución apreciable de la dureza durante la vida útil de la boquilla, estos valores siguen estando dentro de los estándares establecidos por la normativa (150 HV) [101].

Tabla XXIX. Comparativa de dureza Vicker entre las diferentes piezas estudiadas.

	Barra 50 mm	Pieza sin utilizar	Pieza en servicio	
				
1	182	172	153	Zona 1 Contacto H₂O MAX = 157 MIN = 153 $\mu = 155$ $\sigma = 1.6$
2	185	170	155	
3	182	169	155	
4	186	170	157	
5	187	169		
6	190	171	158	Zona 2 Contacto Al MAX = 168 MIN = 158 $\mu = 163.4$ $\sigma = 3.6$
7	194	169	164	
8	191	173	168	
9	195	174	164	
10	193	170	163	
11	195	176	168	Zona 3 Contacto Al y libre MAX = 176 MIN = 168 $\mu = 170.6$ $\sigma = 3.4$
12	186	177	168	
13	193	181	169	
14		179	172	
15		185	176	
16		187	178	Zona 4 Tornillería MAX = 178 MIN = 174 $\mu = 176$ $\sigma = 2$
17		188	174	
18			176	
MAX	195	188		
MIN	182	169		
μ	189	175		
σ	4.7	6.5		

En base al estudio de Badía et al [132], durante el mecanizado de la pieza y el servicio de la misma podría estar produciéndose una sobremaduración del material que conlleva una disminución de las propiedades mecánicas del aluminio, aproximando las características mecánicas de la AA 7075 – T6 a las de la AA 7075 con un tratamiento térmico T73. Las sollicitaciones de estas aleaciones son ligeramente inferiores a las aleaciones con un tratamiento térmico T6, pero, sin embargo, este sobreenviejecimiento controlado mejora las propiedades de corrosión bajo tensión.

En caso de ser necesario, podría realizarse una sobremaduración controlada que mejorara estas propiedades, pero sin empeorar en gran medida las propiedades mecánicas de la aleación. En caso de que el sobreenviejecimiento se produjera durante

el trabajo de la misma, sería necesario estudiar en los futuros ensayos de fatiga el posible efecto de esta sobremaduración causada posiblemente por abrasión y por el calentamiento del agua a consecuencia de su paso por la bomba de agua.

4.10.3 MO de la pieza en servicio

Por último, para poder explicar correctamente las variaciones de dureza del material, se observaron las diferentes zonas medidas con el MO (Figura 266). Como en el caso de la caracterización de las aleaciones de partida, se realizó un ataque Keller (2 ml de HF, 3 ml HNO₃ y 190 ml H₂O durante un tiempo de inmersión de 40 s).

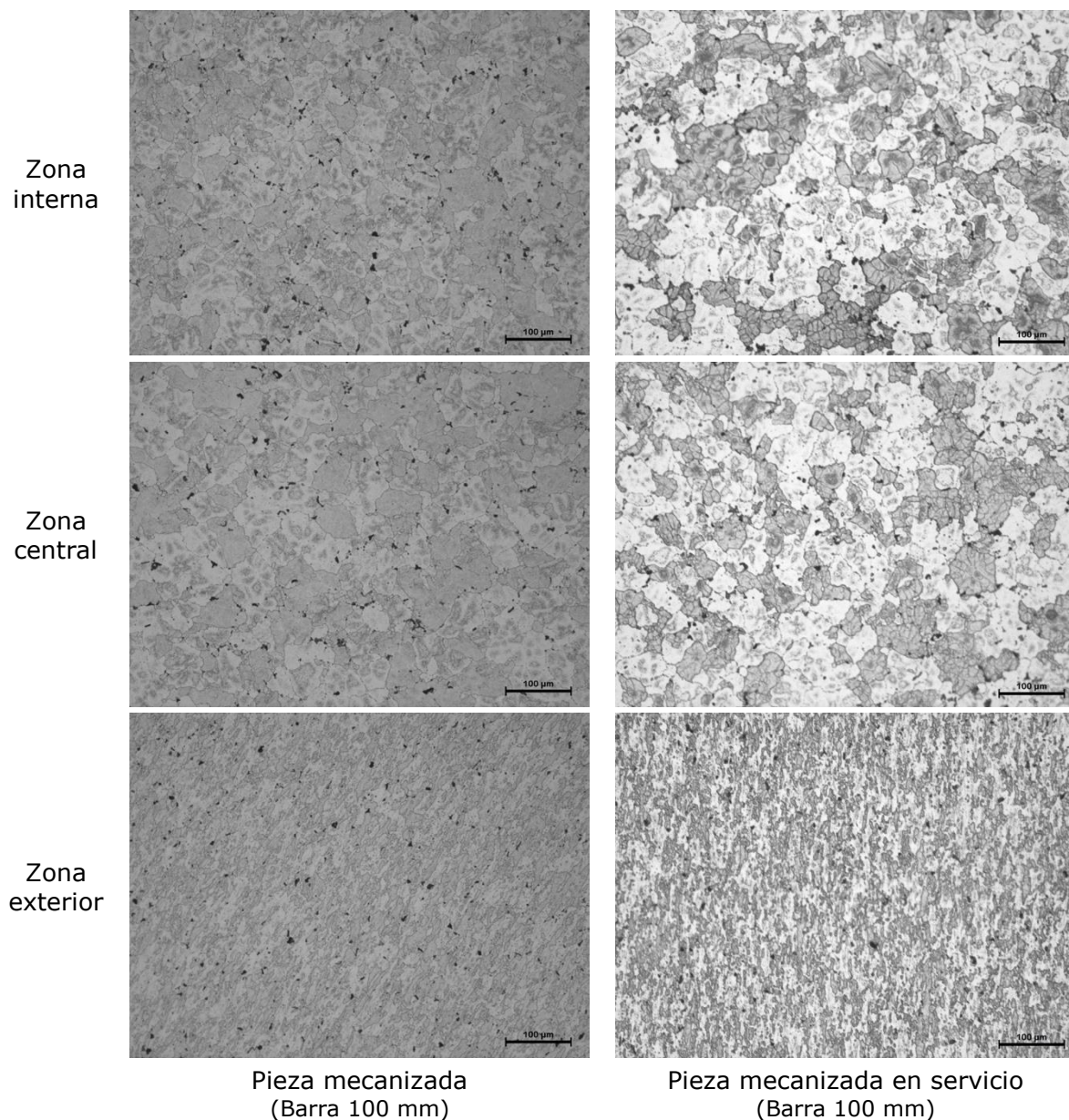


Figura 266. Micrografías de las diferentes zonas de las piezas mecanizadas sin uso y con uso a 200x.

Estableciendo un estudio comparativo entre las estructuras observadas en la pieza mecanizada sin utilizar y en la pieza mecanizada en servicio, apenas se detectan diferencias en su estructura y tamaño de grano.

Es por ello, que puede afirmarse que las variaciones de dureza medidas de la pieza mecanizada sin utilizar a la pieza mecanizada en servicio no conllevan ninguna variación aparente en la microestructura de las mismas. Mediante la utilización del MO a estos aumentos (Figura 266) no se detectan diferencias microestructurales que expliquen la variación de dureza de las diferentes zonas estudiadas entre la pieza mecanizada y la pieza en servicio.

Sin embargo, sí se aprecia una variación en el tamaño de grano desde el centro de la pieza a los extremos. Las zonas interiores presentan un mayor tamaño de grano y las zonas exteriores un menor tamaño de grano, lo que concuerda con los valores de dureza medidos, siendo menores en las zonas interiores de la pieza.

Para completar el estudio, se compararon estas micrografías con el material de partida. El tamaño de grano de la barra de 50 mm del material de partida sin mecanizar (Figura 267) concuerda con los tamaños de grano observados en las zonas internas y central, pero sin embargo los valores de dureza son mayores que los de las piezas mecanizadas.

La disminución del tamaño de grano en las zonas exteriores, con su consecuente aumento de dureza, puede achacarse a las operaciones de mecanizado. La realización de los diferentes taladros exteriores ha aumentado la temperatura en esas zonas del material y el consecuente enfriamiento no controlado ha causado la generación de un menor tamaño de grano.

Por otro lado, las variaciones de dureza de las zonas internas cuyo tamaño de grano es similar a la barra de origen, podría deberse a un efecto de sobremaduración del material, siendo su efecto más plausible en la pieza mecanizada en servicio en contacto directo con el agua y el aire a presión

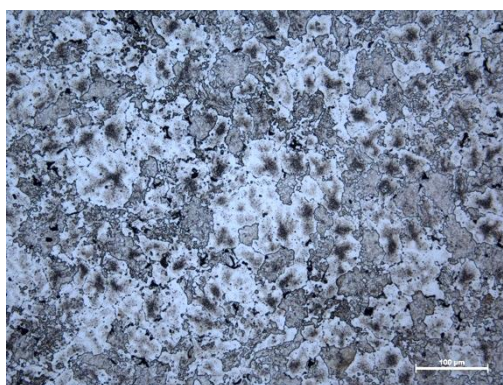


Figura 267. Micrografía de la estructura de la barra de partida de 50 mm de AA 7075 - T6.

5. Conclusiones

En base a los objetivos fijados al inicio de la presente memoria de investigación la primera conclusión obtenida del trabajo es que se han alcanzado los mismos, como se puede constatar en la memoria de investigación presentada.

De los resultados presentados y discutidos con anterioridad, se han obtenido las conclusiones siguientes:

- El rediseño de las boquillas permitió la realización de planos de fabricación que facilitan la manufactura de las diferentes boquillas, reduciendo el coste de fabricación. Además, se ha realizado la selección de los materiales que permiten optimizar la fabricación de las boquillas en función de las condiciones de trabajo previstas y las tensiones que han de soportar los materiales en operación.
- La modelación de las tensiones en operación de cada una de las boquillas permiten identificar las piezas más sensibles en un funcionamiento anómalo de la boquilla. Se determinó dónde se concentran las tensiones de VM y qué piezas son susceptibles de deformación permanente y rotura en caso de obstrucción de la boquilla.
- La modelación de las tensiones demuestra que se favorece la integridad del diseño con aumentos de espesores de las piezas sensibles o, simplemente, con la utilización de una aleación de Al con propiedades mecánicas elevadas, como es la AA 7075 – T6.
- La modelación de las boquillas diseñadas suponiendo un comportamiento normal de las mismas de manera conservativa, manifiesta que su vida útil es elevada. En el caso más desfavorable el modelo predice una vida útil de 9 años.
- Se ha diseñado un laboratorio que permite el control y seguimiento de la existencia de aerosoles en el ambiente de ensayo. Lo que ha permitido determinar el tiempo de vuelo (TOF) de distintos agentes simuladores.
- Los experimentos realizados permiten aseverar que aquellos aerosoles que posean un menor tamaño de partícula, y por ende, una mayor área superficial geométrica específica, presentan un mayor TOF. En el caso de los empleados en esta investigación, es el $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ el compuesto de menor tamaño seleccionado y con mayor TOF. Por otro lado, los compuestos con menor TOF son el $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y el CsCl , debido a presentar los mayores valores de tamaño de partícula y densidad, respectivamente.
- Para los ensayos en el COUNTERFOG - Lab se diseñó un método de dispersión del agente que reproduce el efecto de un RDD o una bomba sucia. Asimismo, se optimizaron los métodos de detección adecuados para

los diferentes ensayos previstos, pudiéndose establecer los procedimientos experimentales requeridos.

- Se ha demostrado la eficiencia de la niebla generada con los sistemas diseñados en la eliminación de aerosoles. Diseñándose unas condiciones óptimas para la precipitación de aerosoles que son las siguientes:
 - La niebla sin aditivos generada por la boquilla B 1:2, a una presión de agua de 0.4 MPa y una presión de aire de 1.8 MPa, alcanza una limpieza completa de la atmósfera contaminada con aerosoles polares a los 17 min desde la generación de la misma.
 - La niebla, sin aditivos o con Bio – Sel al 0.5 % v / v generada por la boquilla B 1:2, a una presión de agua de 0.4 MPa y una presión de aire de 1.8 MPa, no consigue una limpieza efectiva de la atmósfera contaminada con aerosoles apolares.
 - En el caso de utilizar disoluciones, la niebla generada con isopropanol al 1 % v / v por la boquilla B 1:2, a una presión de agua de 0.4 MPa y una presión de aire de 1.8 MPa, sí logra una limpieza efectiva de una sala contaminada con un aerosol hidrofóbico. Además, esta limpieza se produce en un tiempo menor, en torno a 11 - 12 min desde la dispersión de la misma.
- Tras dos años de vida útil, las boquillas empleadas en los ensayos presentan una corrosión generalizada y corrosiones por picadura debido a las condiciones de temperatura, humedad, aditivos y limpiadores, iones Cl^- , agentes NRBQ y fuego a las que fueron expuestas.

En base a los ensayos realizados, se demuestra la eficiencia de las boquillas empleadas en esta memoria, que generan nieblas con una dispersión de tamaño de gota que favorece la aparición de procesos de sorción por el sólido suspendido facilitando su precipitación y minimizando su tiempo de permanencia en el aire y su posible dispersión.

6. Líneas futuras

Actualmente se continúa trabajando en el proyecto de investigación COUNTERFOG tomando como base el trabajo de investigación expuesto en la presente memoria de tesis. Las vías de investigación abiertas son las siguientes:

- Ensayos con CWA. Estos compuestos requieren del empleo de nanopartículas de óxidos metálicos para una mayor eficiencia en la limpieza. La boquilla requiere un rediseño al comprobarse que son más efectivas en seco que mezcladas con la niebla.
- Ensayos con agentes Biológicos. Se pretende comprobar la efectividad de las técnicas y procesos empleados en los ensayos con NR y CWA, en agentes biológicos.
- Optimización de los tiempos de limpieza. Se están investigando la generación de nieblas mixtas para la optimización de los procesos de caída de la niebla. Asimismo, se están adquiriendo nuevos sistemas de detección.
- Realización de ensayos combinados. Ensayos con fuego y NRBQ.
- Ensayos escala real. Tanto en interiores como en exteriores. Para ello se fabricaron 10 boquillas en serie.



Boquilla fabricada en serie



Camión COUNTERFOG

- Estudio experimental de la vida útil de la boquilla y su comparación con las simulaciones realizadas.



Trabajo en continuo de la boquilla. A finales del 2016 llevaba 500h trabajadas en continuo.

- Por último, una vez supere los ensayos impuestos por la normativa UNE – CEN/TS 14972 [77] para sistemas de agua nebulizada antiincendios, se evaluará la posibilidad de patentar estos sistemas.

7. Bibliografía

- [1] H. Maass. (2013) A brief history of chemical warfare. *The Week*. Disponible: <http://theweek.com/articles/460335/brief-history-chemical-warfare>
- [2] "Ancient Persians who gassed Romans were the first to use chemical weapons," en *The Telegraph*, ed, 2009.
- [3] A. J. Mauroni, *Chemical and Biological Warfare: A reference handbook*, 2th ed.: ABC-CLIO, 2007.
- [4] "Las armas NBQ-R como armas de terror," Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional 2011.
- [5] J. A. Romano, B. J. Lukey y H. Salem, *Chemical Warfare Agents. Chemistry, Pharmacology, Toxicology and Therapeutics*, Second Edition ed.: CRC Pres, 2008.
- [6] *Protocol for the Prohibition of the Use in War of Asphyxiating, Poisonous or Other Gases, and of Bacteriological Methods of Warfare*, ONU, 1925.
- [7] J. Rada, "Cuando España gaseó a civiles en la Guerra del Riff," en *20minutos*, ed, 2015.
- [8] R. Pérez, "Armas químicas en Burgos," en *Diario de Burgos*, ed, 2012.
- [9] S. H. Harris, *Factories of Death: Japanese Biological Warfare 1932-45 and the American Cover-up*: Routledge, 1994.
- [10] *Non-State Actors and the Proliferation of Weapons of Mass Destruction. Resolution 1540: A Spanish Contribution*: Ministry of Defense, 2016.
- [11] ONU. *Desarme. Oficina de asuntos de desarme de las Naciones Unidas*. Disponible: <http://www.un.org/es/disarmament/>
- [12] C. Martos, "Los soldados utilizados como 'conejillos de indias' denuncian al Gobierno de EEUU," en *El Mundo*, ed, 2012.
- [13] Disponible: <http://www.historiasiglo20.org/GLOS/vietnam.htm>
- [14] B. S. Atiyeh, S. W. A. Gunn y S. N. Hayek, "Military and Civilian Burn Injuries During Armed Conflicts," *Ann Burns Fire Disasters*, vol. 20, pp. 203-215, 2007.
- [15] L. Marrasa, "El agente naranja sigue matando en Vietnam cuarenta años después," en *eldiario.es*, ed, 2015.
- [16] (2017). *Chemical Warfare*. Disponible: https://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_warfare
- [17] (2012). *Fighting Dirty - Chemical Warfare's Worst Offenders*. Disponible: <http://militaryhistorynow.com/2012/12/12/fighting-dirty-chemical-warfares-worst-offenders/>

- [18] *Convención sobre la prohibición del desarrollo, la producción, el almacenamiento y el empleo de armas químicas y sobre su destrucción*, OPAQ, 1992.
- [19] "Siria: Nuevo ataque químico contra Aleppo, un crimen de guerra," ed: Amnistía Internacional, 2016.
- [20] "El peor ataque con armas químicas de los últimos 25 años," en *El Mundo*, ed, 2013.
- [21] "Nuevas evidencias de ataques de Asad con gas cloro en Aleppo," en *La Vanguardia*, ed, 2016.
- [22] J. Domingo y R. Pita, "El cloro como arma: de la primera guerra mundial al conflicto sirio," ed: Instituto Español de Estudios Estratégicos, 2014.
- [23] L. M. Hurtado, "EEUU disparó en Siria el polémico uranio empobrecido," en *El Mundo*, ed, 2017.
- [24] T. Gibbons-Neff, "Saudi Arabia appears to be using American-supplied white phosphorus in its war in Yemen," en *Independent*, ed, 2016.
- [25] R. Johnston. (2015). *Summary of historical attacks using chemical or biological weapons*. Disponible: www.johnstonearchive.net/terrorism/chembioattacks.html
- [26] P. Bonet, "El ántrax ya mató en Rusia," en *El País*, ed, 2001.
- [27] V. Olazábal, "India recuerda su mayor tragedia industrial: el desastre de Bhopal," en *El Mundo*, ed, 2014.
- [28] I. Viana, "El infierno químico de Bhopal," en *ABC*, ed, 2010.
- [29] A. Francis, "Bhopal: el desastre que envenenó a 500.000 personas," en *BBC*, ed, 2014.
- [30] *Real Decreto 229/2006, de 24 de febrero, sobre el control de fuentes radiactivas encapsuladas de alta actividad y fuentes huérfanas.*, RD 229/2006, 2006.
- [31] "The Radiological Accident in Goiânia," OIEA 1988.
- [32] J. Quiñones, "Consecuencias de la pérdida de control sobre las fuentes y su uso malévolo," en *Curso Regional de Capacitación sobre la Seguridad Física de Fuentes Radiactivas*, Madrid, 2014.
- [33] "Informe respuesta a la pregunta formulada por D. Juan Antonio López de Uralde. representante de la asociación greenpeace sobre el accidente de ACERINOX de 1998," CSN 2006.
- [34] "Un equipo de rayos X causó el escape en Acerinox, según Piqué," en *El País*, ed, 1998.
- [35] A. Uriona, "Un incidente radiactivo obliga a parar una de las mayores acerías de España," en *El País*, ed, 2003.
- [36] "El CSN da por zanjado el incidente radiológico de Sidenor, que retoma la actividad," en *Europa press*, ed, 2007.
- [37] *Terrorismo radiológico y nuclear*: INTERPOL, 2015.

- [38] "IAEA Incident and Trafficking DataBase (ITDB)," OIEA 2016.
- [39] *INTERPOL*. Disponible: <https://www.interpol.int/es>
- [40] "Detección e identificación de agentes de guerra química. Estado de arte y tendencia futura," Ministerio de defensa 2011.
- [41] K. Kim, O. G. Tsay, D. A. Atwood y D. G. Churchill, "Destruction and Detection of Chemical Warfare Agents," *Chem. Rev.*, vol. 111, pp. 5345-5403, 2011.
- [42] "Detección e identificación de agentes de guerra biológica. Estado del arte y tendencias futuras," Ministerio de Defensa 2010.
- [43] *Tratado sobre la no proliferación de las armas nucleares*, UNODA, 1968.
- [44] *Convención sobre la prohibición del desarrollo, la producción y el almacenamiento de armas bacteriológicas (biológicas) y toxínicas y sobre su destrucción*, UNODA, 1972.
- [45] *Resolución 1540*, CSNU, 2004.
- [46] *IAEA (International Atomic Energy Agency)*. Disponible: www.iaea.org
- [47] *GICNT - Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism*. Disponible: www.gicnt.org
- [48] *Identificación de fuentes y dispositivos radiativos*, OIEA, 2009.
- [49] *Clasificación de fuentes radiactivas*, OIEA, 2009.
- [50] J. Quiñones, "Las fuentes radiactivas, tipos y usos," en *Curso Regional de Capacitación sobre la Seguridad Física de Fuentes Radiactivas*, Madrid, 2014.
- [51] J. Quiñones, "Enfoque Gradual y Clasificación de las Fuentes " en *Curso Regional de Capacitación sobre la Seguridad Física de Fuentes Radiactivas*, Madrid, 2014.
- [52] "JANIS," 4.0 ed: OECD Nuclear Energy Agency, 2014.
- [53] A. B. Mickelson, *Medical Consequences of Radiological and Nuclear Weapons*: U.S. Government Printing Office, 2012.
- [54] *Radiation Source. Use and Replacement*: National Research Council. National Academies Press 2008.
- [55] S. L. Bartelt-Hunt, D. R. U. Knappe y M. A. Barlaz, "A review of Chemical Warfare Agent Simulants for the Study of Enviromental Behavior," *Crit. Rev. Env. Sci. Tec.*, vol. 38, pp. 112-136, 2008.
- [56] B. C. Singer, A. T. Hodson, H. Destailats, T. Hotchi, K. L. Revzan y R. G. Sextro, "Indoor Sorption of Surrogates for Sarin and Related Nerve Agents," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, pp. 3203-3214, 2005.
- [57] G. K. Beer Singh, K. S. Prasad, R. K. Pandey, Danikhel y R. Vijayaraghavan, "Decontamination of Chemical Warfare Agents," *Def. Sci. J.*, vol. 60, pp. 428-441, 2010.

- [58] N. B. Munro, S. S. Talmage, G. D. Griffin, L. C. Waters, A. P. Watson, J. F. King, *et al.*, "The Sources, Fate, and Toxicity of Chemical Warfare Agent Degradation," *Environ. Health Perspect.*, vol. 107, 1999.
- [59] "D 4.8 Report on biological (surrogates) decontamination effectiveness," UAH 2016.
- [60] "Detección e identificación de material nuclear y radiológico. Estado del arte y tendencia futura," Ministerio de defensa 2009.
- [61] *Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes*, RD 783/2001, 2001.
- [62] *Actuaciones a seguir en el caso de personas que hayan sufrido un accidente radiológico*, CSN GS-7.5/05, 2005.
- [63] "Cleanup of large areas contaminated as a result of a nuclear accident," OIEA, Viena 1989.
- [64] *Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos*, RD 102/2014, 2014.
- [65] R. Sferopoulos, "A Review of Chemical Warfare Agent (CWA) Detector Technologies and Comercial-Off-the-Shelf Items," Australian Government 2009.
- [66] B. D. d. Greñu, D. Moreno, T. Torroba, A. Berg, J. Gunnars, T. Nilsson, *et al.*, "Fluorescent Discrimination between Traces of Chemical Warfare Agents and their Mimics," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 136, pp. 4125-4128, 2014.
- [67] *Manual de seguridad contra incendios*: MAPFRE, 1997.
- [68] *Real Decreto 1942/1993, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios*, RD 1942/1993, 1993.
- [69] *Clases de fuego*, AENOR UNE-EN 2:1994/A1:2005, 2005.
- [70] *Clases de Fuego*, AENOR UNE-EN 2:1994, 1994.
- [71] *Extintores portátiles de incendios. Parte 7: Características, requisitos de funcionamiento y métodos de ensayo*, AENOR UNE-EN 3-7:2004+A1:2008, 2008.
- [72] Prefire. *Espuma extinción de incendios - Características generales*. Disponible: <http://www.prefire.es/proteccion-contra-incendios/espuma-extincion-incendios-1.php>
- [73] ANSUL. *Sistemas de extinción de incendios INERGEN®*. Disponible: http://206.132.36.16/es/Products/clean_agent_systems/inergen.asp
- [74] 3M. Novec. Disponible: http://www.3m.com/3M/en_US/novec/products/1230-fire-protection-fluid/
- [75] *Sistemas fijos de lucha contra incendios. Sistemas de rociadores automáticos. Diseño, instalación y mantenimiento*, AENOR UNE-EN 12845:2005+A2:2010, 2010.
- [76] Marioff. *HI-FOG® water mist fire protection*. Disponible: <http://www.marioff.com/>

- [77] *Sistemas fijos de lucha contra incendios. Sistemas de agua nebulizada. Diseño e instalación.*, AENOR UNE-CEN-TS-14972:2014, 2014.
- [78] MAPFRE. *Guías de Seguridad. Agua nebulizada.* Disponible: https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1030472
- [79] Tyco. *Aquamist. Watermist fire protection. Fire Protection Products.* Disponible: <https://www.tyco-fire.com/index.php?P=Aquamist&S=Home>
- [80] LPG. *AQUAFOG. Agua nebulizada.* Disponible: <http://www.zensitec.com.ar/Brochures/Water%20Mist%20Aqua%20Nebulizada%20-%20LPG%20-%20Zensitec.pdf>
- [81] *BEX Sparay nozzles.* Disponible: <http://bex.com/>
- [82] PNR. (CTG UG18 BR). *General purpose Spray Nozzles.* Disponible: www.pnr-nozzles.com
- [83] PNR. (CTG SH 07 EU). *Spray Engineering Handbook.* Disponible: www.pnr-nozzles.com
- [84] *Standard on Water Mist Fire Protection Systems*, NFPA 750, 2000.
- [85] *Fixed firefighting systems - Watermist systems - Design and installation*, BSI EN 14972, 2004.
- [86] L. Jian-yong, L. Dong, Z. Zhe y D. Wen-li, "Progress in Research and Application of Electronic Ultrasonic Water Mist Fire Suppression Technology," *Procedia Engineering*, vol. 11, pp. 288-295, 2011.
- [87] L. Jian-Yong, Z. De-Ming, Z. Zhe y L. Dong, "Experimental Study on Ultra-fine Water Mist Extinguishing Heptane Cup Fire in Confined Space," *Procedia Engineering*, vol. 52, pp. 225-229, 2013.
- [88] K. Omer y N. Ashgriz, "Spray Nozzles," in *Handbook of Atomization and Sprays*, ed: Springer, 2011.
- [89] "D 1.1 First model of the nozzle," University of Strathclyde 2014.
- [90] "D 1.2: Detailed mechanical 3D model of nozzle," University of Strathclyde 2014.
- [91] "D 1.4 Nozzle redesign," University of Strathclyde 2015.
- [92] "ANSYS," vol. 17.0, ed: ANSYS Inc, 2016.
- [93] "D 2.1 Design of Fog Dynamics Laboratory," UC3M 2015.
- [94] "D 4.1. Legal documents and registry of labour safety and medical surveillance of research staff participating," CIEMAT 2016.
- [95] L. Pascual, F. Pino, L. J. Amigo, L. B. Ferrera y J. Quiñones, "D 2.3. Fog dynamics laboratory finished and ready.," CIEMAT 2015.
- [96] "D 4.6 Report on fog dynamics," UAH 2016.

- [97] "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials," in *ASM Handbook*. vol. 2, ed: ASM international, 1990.
- [98] A. Orozco, "Optimización de propiedades mecánicas de las aleaciones aluminio Al-7%Si y Al 7075 mediante deformación plástica severa: Procesado por fricción batida (FSP) y extrusión en canal angular constantes (ECAP)," Departamento de metalurgia física. Centro nacional de investigaciones metalúrgicas. CSIC., UCM, 2014.
- [99] H. V. Atkinson, K. Burke y G. Vaneetveld, "Recrystallisation in the Semi-Solid State in 7075 Aluminium Alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 490, pp. 266-276, 2008.
- [100] *Aluminio y aleaciones de aluminio. Composición química y forma de los productos de forja. Parte 3: Composición química y forma de los productos.*, AENOR UNE-EN 573-3:2009/1M:2011, 2012.
- [101] *Aluminio y aleaciones de aluminio. Varillas, barras, tubo y perfiles extruados. Parte 2: Características mecánicas.*, AENOR UNE-EN 755-2:2016, 2016.
- [102] M. P. Groover, *Fundamento de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas*, 1a. Ed. ed.: Pearson Educación, 1997.
- [103] *Especificación geométrica de productos (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 1: Base de tolerancias, desviaciones y ajustes.*, AENOR UNE-EN ISO 286-1:2011/AC:2013, 2011.
- [104] *Especificación geométrica de productos (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 2: Tablas de las clases de tolerancia normalizadas y de las desviaciones límite para agujeros y ejes.* , UNE-EN ISO 286-2:2011, 2011.
- [105] *Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo*, RD 486/1997, 1997.
- [106] "D 4.10 Report on harmfulness," UAH 2016.
- [107] Z. W. Dai, L. S. Wan, X. J. Huang, J. Ling y A. K. Xu, "Selective Adsorption of Isopropyl Alcohol Aqueous Solution on Polypropylene Surfaces: A Molecular Dynamic Simulation," *J. Phys. Chem.*, vol. 115, pp. 22415-22421, 2011.
- [108] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, E8/E8M-09, 2010.
- [109] "Ces Selector," vol. Edupack, ed: GRANTA DESIGN, 2013.
- [110] M. F. Ashby y D. R. H. Jones, *Engineering materials 1*: Butterworth Heinemann, 1996.
- [111] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, Second edition ed.: Butterworth Heinemann, 1999.
- [112] "SolidWorks," vol. Educational, ed, 2013.
- [113] N. H. Kim y B. V. Sankar, "Chap. 2 Uniaxial Bar and Truss Elements," in *Finite Element Analysis and Design*, ed: Wiley, 2008, p. 432.

- [114] R. E. Smallman y R. J. Bishop, *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*, 6ed ed.: BH, 1999.
- [115] N. Willems, J. T. Easley y S. T. Rolfe, *Resistencia de materiales*. Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL, 1984.
- [116] "Medusa-Hydra Chemical Equilibrium," ed, 2016.
- [117] *Dibujos técnicos. Acotación. Principios generales, definiciones, métodos de ejecución e indicaciones especiales.*, AENOR UNE 1039:1994, 1994.
- [118] *Especificación geométrica de productos: Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 2: Tablas de las clases de tolerancia normalizadas y de las desviaciones límite para agujeros y ejes. (ISO 286-2:2010)*. AENOR UNE-EN ISO 286-2:2011, 2011.
- [119] *Fluid power systems - O-rings - Part 1: Inside diameters, cross-sections, tolerances and designation codes*, ISO ISO 3601-1:2012, 2012.
- [120] *Fluid power systems -- O-rings -- Part 2: Housing dimensions for general applications*, ISO ISO 3601-2:2016, 2016.
- [121] (2008). *FTR*. Disponible: <http://www.ftr.com.tr/default.asp?sayfa=goster&no=c2a>
- [122] PNR, "Introdution. Some uses of spray nozzles,".
- [123] D. R. Clarke y S. R. Phillpot, "Thermal barrier coating materials," *Mater.Today*, 2005.
- [124] P. M. Natishan, S. H. Lawrence, R. L. Foster, J. Lewis y B. D. Sartwell, "Salt fog corrosion behavior of high-velocity oxygen-fuel thermal spray coatings compared to electrodeposited hard chromium," *Surf. Coat. Tech.*, vol. 130, pp. 218-223, 2000.
- [125] W. D. Callister, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* vol. 1. Barcelona: Reverté, 2009.
- [126] J. Pérez-Illarbe, J. F. Carrasquilla y L. Solaberrieta, "Estudio de fracturas de tochos de extrusión de perfiles extruidos en aleación de aluminio AA 6082," *Anales de Mecánica de la Fractura*, vol. 1, pp. 199-204, 2001.
- [127] "Fractography," in *ASM Metals Handbook*. vol. 12, ed: ASM International, 1987.
- [128] "Alloy Phase Diagrams," in *ASM Handbook*. vol. 3, ed: ASM International, 1992.
- [129] E. Iglesias y J. Quiñones, "Analogous materials for studying spent nuclear fuel: The influence of particle size distribution on the specific surface area of irradiated nuclear fuel," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 254, pp. 6890-6896, 2008.
- [130] D. A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, 2nd ed.: Prentice Hall, 1996.
- [131] M. Pourbaix, *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*, 2 ed.: National Association of Corrosion Engineers, 1974.

- [132] J. M. Badía, J. M. Antoranz, P. Tarín, C. López-Castillo, A. G. Simón y N. M. Piris, "Influencia de la sobremaduración en las propiedades mecánicas y comportamiento a corrosión bajo tensión de una aleación de aluminio 7075 T6," *Bol. Soc. Esp. Ceram. V.*, vol. 43, pp. 224-228, 2004.